

**NICOLE BORCHARDT**

**ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES POR RETROANÁLISE  
DO RIO PAUTE: APLICAÇÃO NOS ESTUDOS CONSTRUTIVOS DA  
USINA HIDROELÉTRICA MAZAR – EQUADOR**

**Tese apresentada como requisito parcial à  
obtenção do grau de Doutora em Geologia  
Ambiental, Curso de Pós-Graduação em  
Geologia, Setor de Ciências da Terra,  
Universidade Federal do Paraná.**

Orientador: Prof. Dr. Alberto Pio Fiori

Co-orientador: Prof. Dr. Eduardo Salamuni

**CURITIBA**

**04 DE JUNHO DE 2012**

# TERMO DE APROVAÇÃO

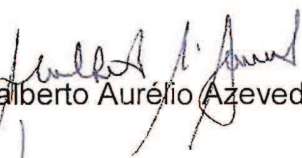
**NICOLE BORCHARDT**

***"Análise da estabilidade de taludes por retroanálise do Rio Paute: aplicação nos estudos construtivos da Usina Hidroelétrica Mazar - Equador"***

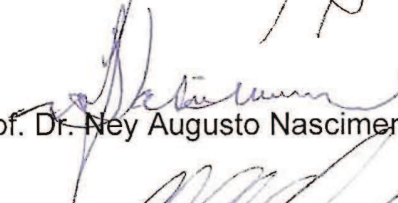
Tese de doutorado aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor no Curso de Pós-Graduação em Geologia, área de concentração em Geologia Exploratória, da Universidade Federal do Paraná, Comissão formada por:



Prof. Dr. Wilson Shoji Iyomasa - IPT



Prof. Dr. Adalberto Aurélio Azevedo – IPT



Prof. Dr. Ney Augusto Nascimento - UFPR



Prof. Dr. Luiz Eduardo Mantovani – UFPR



Prof. Dr. Alberto Pio Fiori - UFPR  
Presidente

Curitiba, 4 de junho de 2012





*Foto: autora (2008)*

*... aos que têm a Cordilheira  
por arranha-céus,  
e fazem de suas fendas morada!*

## AGRADECIMENTOS

Acima de tudo, sou grata a Deus por mais um sonho compartilhado do Seu coração ao meu para cumprimento dos Seus propósitos que vão além destas páginas.

A Ricardo Hey Andrzejewski por dar crédito a esta proposta de pesquisa e vislumbrar a Cordilheira dos Andes como objeto de estudo.

A Leme Engenharia, Demóstenes G. Pinheiro e Flávio M. L. Campos, por oportunizar o desenvolvimento científico através de parceria durante estágio no exterior.

A Paulo Roberto do Nascimento pela confiança e motivação a prosseguir.

Ao amigo e orientador Alberto Pio Fiori pela jornada científica de longa data.

A Erik Wunder pelo exercício da maestria e incentivo à carreira acadêmica.

A Ana Lúcia Yoda por dispor informações técnicas pertinentes a UHE Mazar.

Ao Consórcio Gerência Mazar, Marcelo G. Costa e Jorge Moreno pela intervenção burocrática junto ao Governo do Equador e Hidropaute para aquisição de material técnico.

Ao *Instituto Geográfico Militar del Ecuador* por disponibilizar fotos aéreas do local.

A Eduardo Almeida pela contribuição científica no tocante à geologia equatoriana.

A CAPES pelo investimento no Programa de Estágio no Exterior.

Ao *Centro di Geotecnologie della Università degli Studi di Siena* – Itália, pela oportunidade de aprendizado tecnológico e vivência em *campus* italiano.

Ao prof. Luís Fernandes e ao Departamento de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Paraná pelo auxílio em todos os trâmites burocráticos do curso.

A família Kozciak pela cumplicidade e companheirismo durante os estudos.

Aos amigos acrescidos nesta etapa, que somaram seus talentos à tese: Juan Carlos Lahuate Mendoza, Rolando Enrique Guadalupe Alcoser e José Henrique Pereira.

Por fim, às muitas mãos que se entrelaçaram em oração por mim durante este tempo: Mara Gomes Protta, Roberto Solyom, Juliana Janssen, Laura Xavier de Souza e pais, Angélica Carrillo, Giovanna Marcela Castillo, e tantas outras cujos nomes desconheço, mas que seguramente colherão as bênçãos da intercessão em secreto!

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	9
LISTA DE TABELAS .....	11
LISTA DE QUADROS .....	13
LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATÓES E NOMENCLATURAS .....	14
ABSTRACT .....	17
RESUMO.....	18

### **CAPÍTULO 1..... 19**

1.1	JUSTIFICATIVA .....	20
1.2	OBJETIVOS .....	21
1.3	OBJETO .....	22
1.4	MATERIAIS .....	22
1.5	ETAPAS EXECUTIVAS .....	25
1.5.1	PRIMEIRA ETAPA: ATIVIDADES DE ESCRITÓRIO.....	25
1.5.2	SEGUNDA ETAPA: ATIVIDADES DE CAMPO .....	25
1.5.3	TERCEIRA ETAPA: COMPILAÇÃO DE ENSAIOS.....	26
1.5.4	QUARTA ETAPA: APRIMORAMENTO DE TECNOLOGIAS.....	26
1.5.5	QUINTA ETAPA: APLICAÇÃO DO MÉTODO .....	26

### **CAPÍTULO 2..... 28**

2.1	GÊNESE ANDINA.....	29
2.1.1	ZONAS FISIAGRÁFICAS DO EQUADOR.....	30
2.2	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS.....	32
2.2.1	BACIA HIDROGRÁFICA.....	34
2.3	GEOLOGIA REGIONAL.....	38
2.3.1	EMBASAMENTO DA CORDILHEIRA DOS ANDES.....	38
2.3.1.1	Bacia Sedimentar.....	39
2.3.1.2	Vulcanismo.....	40
2.3.1.3	Falhas Quaternárias.....	41
2.3.1.4	Sismos .....	42
2.4	GEOLOGIA LOCAL.....	42
2.4.1	LITOLOGIA E ESTRATIGRAFIA .....	44
2.4.1.1	Unidade Alao-Paute (JAP) .....	45
2.4.1.2	Unidade El Pan (JE).....	48
2.4.1.3	Stock vulcânico Pisayambo (MPL).....	48
2.4.1.4	Terraço morfológico Huarainac (QH) .....	48

2.4.1.5	Solos e depósitos recentes (QS).....	49
2.5	TECTÔNICA LOCAL.....	49
2.5.1	EVOLUÇÃO TECTÔNICA .....	49
2.5.2	ESTRUTURA TECTÔNICA .....	50
2.6	GEOMORFOLOGIA .....	51
2.7	HIDROGEOLOGIA.....	53
2.8	CLIMA E PLUVIOMETRIA .....	54
2.9	CASOS DE ESCORREGAMENTOS DA REGIÃO .....	55
2.10	CONTEXTO SÓCIO-ECONÔMICO DA REGIÃO.....	57

### **CAPÍTULO 3..... 59**

3.1	CLASSIFICAÇÃO DE MOVIMENTOS EM MACIÇOS .....	60
3.1.1	TIPOS DE MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA .....	61
3.1.1.1	Rastejo.....	61
3.1.1.2	Queda de bloco.....	61
3.1.1.3	Escorregamento.....	62
3.2	FATORES CONDICIONANTES DE ESCORREGAMENTO .....	65
3.3	MECANISMOS DE RUPTURA .....	66
3.3.1	AÇÃO ANTRÓPICA.....	66
3.3.2	AÇÃO DA ÁGUA.....	67
3.3.2.1	Saturação pelo topo ou descendente.....	68
3.3.2.2	Saturação pela base ou ascendente.....	69
3.3.3	AÇÃO SÍSMICA .....	71
3.3.3.1	Magnitude e Intensidade .....	72
3.3.3.2	Aceleração horizontal.....	74
3.3.3.3	Sismos induzidos .....	78
3.4	MÉTODOS DE ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE ENCOSTAS.....	79
3.4.1	MÉTODO POR PROJEÇÃO ESTEREOGRÁFICA .....	80
3.4.1.1	Análise estereográfica para escorregamento planar.....	81
3.4.2	MÉTODO DETERMINÍSTICO.....	82
3.4.2.1	Método Determinístico por Retroanálise .....	84
3.5	ANÁLISE DE RUPTURA PLANAR .....	85
3.5.1	ANÁLISE ESTÁTICA .....	86
3.5.2	ANÁLISE PSEUDO-ESTÁTICA .....	89

### **CAPÍTULO 4..... 91**

4.1	MÉTODO DE CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO .....	91
4.1.1	INTERPRETAÇÃO GEOFÍSICA .....	95
4.2	DESCRIÇÃO DAS ZONAS POTENCIALMENTE INSTÁVEIS.....	97
4.2.1	OSOMACHE NORTE.....	97
4.2.2	OSOMACHE .....	98
4.2.3	SANTA RITA.....	99
4.2.4	TUBÁN.....	100
4.2.5	OSOYACU.....	101
4.2.6	ÑUÑURCU.....	102

4.2.7	LLAMACÓN .....	103
4.2.8	CHALACAY .....	104
4.2.9	QUEBRADA HONDA .....	105
4.2.10	LAS PALMAS .....	106
4.2.11	LAS JUNTAS .....	107
4.3	CONSIDERAÇÕES SOBRE AS ZONAS INSTÁVEIS .....	108
4.4	ATRIBUTOS GEOTÉCNICOS DOS SOLOS COLUVIONARES .....	109
4.4.1	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO .....	109
4.4.1.1	Análise granulométrica .....	111
4.4.1.2	Teor de umidade (h) .....	111
4.4.1.3	Límite de Liquidez (LL) .....	112
4.4.1.4	Límite de Plasticidade (LP) .....	112
4.4.1.5	Índice de Plasticidade (IP) .....	112
4.4.1.6	Massa e peso específico ( $\rho$ e $\gamma$ ) dos solos coluvionares .....	113
4.4.2	CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS - SUCS .....	114
4.4.3	PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DO SOLO COLUVIONAR .....	115
4.4.3.1	Ângulo de atrito de solos coluvionares por retroanálise .....	115
4.4.3.2	Ensaio triaxial .....	118
4.5	ATRIBUTOS GEOTÉCNICOS DOS MACIÇOS ROCHOSOS .....	119
4.5.1	CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA .....	119
4.5.1.1	Massa e peso específico ( $\rho$ e $\gamma$ ) das rochas descomprimidas e alteradas .....	119
4.5.1.2	Características das descontinuidades .....	120
4.5.1.3	Índice de compressão puntiforme ( $I_s$ ) e resistência à compressão simples .....	120
4.5.1.4	RQD .....	121
4.5.1.5	Classe RMR .....	121
4.5.2	PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DA ROCHA DESCOMPRIMIDA E ALTERADA - RDA ..	121
4.5.2.1	Ensaio de cisalhamento direto .....	122
4.5.2.2	Ângulo de atrito de rocha descomprimida e alterada por retroanálise .....	123

## **CAPÍTULO 5..... 128**

5.1	DETERMINAÇÃO DO FATOR DE SEGURANÇA PARA COESÃO 0 E $\phi$	
	RETROANALISADO .....	131
5.1.1	CONDIÇÃO ESTÁTICA .....	131
5.1.1.1	Análise 1 .....	131
5.1.1.2	Análise 2 .....	132
5.1.1.3	Análise 3 .....	133
5.1.2	CONDIÇÃO DINÂMICA DE PROJETO .....	134
5.1.2.1	Análise 4 .....	134
5.1.2.2	Análise 5 .....	135
5.1.2.3	Análise 6 .....	136
5.1.3	CONDIÇÃO DINÂMICA SUPERESTIMADA .....	137
5.1.3.1	Análise 7 .....	137
5.1.3.2	Análise 8 .....	138
5.1.3.3	Análise 9 .....	139
5.2	DETERMINAÇÃO DO FATOR DE SEGURANÇA COM PARÂMETROS REAIS .....	140
5.2.1	CONDIÇÃO ESTÁTICA .....	140
5.2.1.1	Análise 10 .....	140
5.2.1.2	Análise 11 .....	141
5.2.1.3	Análise 12 .....	142
5.2.2	CONDIÇÃO DINÂMICA DE PROJETO .....	143
5.2.2.1	Análise 13 .....	143
5.2.2.2	Análise 14 .....	144
5.2.2.3	Análise 15 .....	145
5.2.3	CONDIÇÃO DINÂMICA SUPERESTIMADA .....	146
5.2.3.1	Análise 16 .....	146
5.2.3.2	Análise 17 .....	147

5.2.3.3	Análise 18 .....	148
5.2.4	RESUMO COMPARATIVO DOS FATORES DE SEGURANÇA.....	149
5.3	DETERMINAÇÃO DO FATOR DE SEGURANÇA PARA AS DEMAIS ÁREAS.....	152
5.3.1	CÁLCULOS DE FATOR DE SEGURANÇA EM AMBIENTE GIS .....	152
5.3.2	ESPACIALIZAÇÃO DE FATOR DE SEGURANÇA.....	156
5.3.3	CONSIDERAÇÃO SOBRE OS MAPAS DE FATOR DE SEGURANÇA .....	163
<b>CAPÍTULO 6.....</b>		<b>166</b>
6.1	CARACTERÍSTICAS DA ÁREA.....	166
6.1.1	SOLOS COLUVIONARES .....	167
6.1.1.1	Caracterização e Classificação .....	167
6.1.1.2	Parâmetros de resistência.....	168
6.1.2	ROCHA DESCOMPRIMIDA E ALTERADA .....	169
6.1.2.1	Caracterização e Classificação Geomecânica .....	169
6.1.2.2	Parâmetros de resistência.....	170
6.2	FATOR DE SEGURANÇA .....	171
6.2.1	DETERMINAÇÃO .....	171
6.2.2	ESPACIALIZAÇÃO .....	172
6.2.3	Conclusões .....	174
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>		<b>174</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1. Carta topográfica <i>Taday</i> ( <i>Cola de San Pablo</i> ), escala 1:50.000.	23
Figura 1-2. a) Mosaico das fotos aéreas de 1983, escala 1:60.000. Numeração das fotos: 19095, 19096 e 19097.	24
Figura 2-1. Localização da República do Equador no Mapa Mundi - 2010.	28
Figura 2-2. Encontro das placas tectônicas.	29
Figura 2-3. Processo de subducção.	29
Figura 2-4. Zonas fisiográficas do Equador.	30
Figura 2-5. Serra: vulcões ativos: (a) Cotopaxi e (b) Chimborazo. (c) Costa e (d) Oriente (Amazônia).	31
Figura 2-6. Em sentido horário: Galápagos e fauna característica: tartaruga gigante; leões-marinhos; iguanas; baleia jubarte; fragata e pássaros de patas azuis ( <i>Foto: autora, 2009</i> ).	32
Figura 2-7. (a) Localização da área de estudo no país e (b) dentro da bacia hidrográfica do rio Paute.	32
Figura 2-8. Bacia hidrográfica do rio Paute, principais acessos à área de estudo e as sub-bacias que a delimitam.	34
Figura 2-9. Localização da Bacia hidrográfica do rio Paute na Bacia Amazônica.	35
Figura 2-10. Aspecto do rio Paute na área de estudo.	36
Figura 2-11. Padrões de drenagem das sub-bacias que compõem a área de estudo, e mudança abrupta de direção do rio Paute após UHE Mazar – conforme DINAGE (2001).	37
Figura 2-12. Falhas quaternárias de direção N40E margeando a área de estudo.	42
Figura 2-13. Mapa de Formações e Unidades geológicas da área de estudo, conforme DINAGE (2001).	43
Figura 2-14. Afloramento da Formação La Ermita.	45
Figura 2-15. Espessuras dos horizontes da Formação La Ermita.	46
Figura 2-16. Afloramento da Formação Ingapata.	46
Figura 2-17. Aspecto da Formação La Letra: (a) afloramento e (b) detalhe.	47
Figura 2-18. Aspecto da Formação San Pablo no rio Llavircay: (a) afloramento e (b) detalhe.	47
Figura 2-19. Relevo de alta colina predominante na região.	51
Figura 2-20. Escorregamento “ <i>La Josefina</i> ” deflagrado em 29 de março de 1993, desestabilizando uma massa de solo e rocha equivalente a 25 milhões de m <sup>3</sup> .	55
Figura 2-21. Rompimento do dique, mobilizando 380 milhões de m <sup>3</sup> de material.	56
Figura 2-22. Manchetes de deslizamentos de encostas em Azuay – Equador, entre 2010 e 2011.	57
Figura 2-23. (a) Centro de Cuenca, com catedral ao fundo; e (b) povoado na serra.	58
Figura 2-24. (a) UHE Mazar; e (b) UHE Molino.	58
Figura 3-1. Indícios de rastejo na área: gretas de tração, árvores inclinadas.	61
Figura 3-2. Queda de blocos.	61
Figura 3-3. (a) Modelo de escorregamento planar; (b) feições rasas em solo e (c) cicatriz antiga.	63

Figura 3-4. (a) Modelo de escorregamento circular e (b) feição na área de estudo.....	64
Figura 3-5. Feição de cunha na área. ....	64
Figura 3-6. Sequência de mecanismo de ruptura por saturação pelo topo: 1, 2 e 3.....	69
Figura 3-7. Mecanismo de ruptura por saturação pela base. ....	71
Figura 3-8. Localização do hipocentro (foco) e do epicentro de um terremoto. ....	71
Figura 3-9. Principais tipos de deslizamentos e estereogramas correlacionados.....	80
Figura 3-10. Condições para que ocorra escorregamento planar. ....	82
Figura 3-11. Modelo de diagrama diagnosticando ruptura planar. ....	82
Figura 3-12. Intervalo de variação de FS em função do coeficiente sísmico ( $K_h$ ) e da magnitude do terremoto.....	83
Figura 3-13. Decomposição da força (P) em força normal ( $P_{\cos i}$ ), tangencial ( $P_{\sin i}$ ) e de resistência (R).....	85
Figura 3-14. Forças atuantes em vertente ilimitada, sem cobertura vegetal e com fluxo de água sub-superficial. ....	87
Figura 3-15. Parâmetros envolvidos na análise de vertente infinita sem cobertura vegetal, com nível freático ( $h_2$ ) e fluxo subsuperficial paralelo à declividade do terreno. ....	88
Figura 4-1. Limite da área caracterizada e zonas instáveis de alta periculosidade. ....	93
Figura 4-2. Detalhe dos escorregamentos das zonas de maior periculosidade com sobreposição de linhas sísmicas.....	94
Figura 4-3. (a) Perfil típico de ruptura translacional em rocha descomprimida e alterada ( $R_{da}$ ); (b) Perfil típico de reativação de escorregamentos em colúvio.....	96
Figura 4-4. Ângulo crítico de inclinação e parâmetros que definem a variável m no colúvio = $h_2/Z_{col}$ .....	116
Figura 4-5. Profundidade do plano de ruptura em horizonte de rocha ( $Z_{Rda}$ ). ....	125
Figura 5-1. Planos de ruptura considerados para cálculo de Fator de Segurança ( $Z_{col}$ e $Z_{Rda}$ ). ....	129
Figura 5-2. Modelo digital do terreno. ....	154
Figura 5-3. Mapa de declividade. ....	155
Figura 5-4. Espacialização de Fator de Segurança para Análise 4.....	157
Figura 5-5. Espacialização de Fator de Segurança para análise 6. ....	158
Figura 5-6. Espacialização de Fator de Segurança para análise 7. ....	159
Figura 5-7. Espacialização de Fator de Segurança para análise 9. ....	160
Figura 5-8. Espacialização de Fator de Segurança para análise 14. ....	161
Figura 5-9. Espacialização de Fator de Segurança para análise 17. ....	162



## LISTA DE TABELAS

Tabela 4-1. Características dos solos coluvionares e sua classificação geotécnica - SUCS. ....	110
Tabela 4-2. Classificação geotécnica dos solos segundo Índice de Plasticidade (IAEG, 1979). ....	112
Tabela 4-3. Valores de massa e peso específico, natural e saturada, dos solos coluvionares. ....	113
Tabela 4-4. Percentuais de saturação considerados para análise. ....	116
Tabela 4-5. Valores de ângulo de atrito interno do colúvio retroanalizados. ....	117
Tabela 4-6. Parâmetros geotécnicos de colúvio obtidos por ensaio triaxial. ....	118
Tabela 4-7. Comparação entre valores retroanalizados e reais de $c$ e $\phi$ para colúvio. ....	118
Tabela 4-8. Valores de massa e peso específico, natural e saturada, das rochas descomprimidas e alteradas. ....	119
Tabela 4-9. Resultados de ensaio de carga pontual para amostras de rocha intacta. ....	120
Tabela 4-10. Valores de resistência à compressão simples de rocha ( $R_{da}$ ) por cisalhamento direto. ....	122
Tabela 4-11. Mergulho aparente das descontinuidades mais favoráveis à instabilidade. ....	124
Tabela 4-12. Valores de ângulo de atrito interno retroanalizados para rocha descomprimida e alterada. ....	126
Tabela 5-1. Fator de Segurança das áreas instáveis para análise 1. ....	132
Tabela 5-2. Fator de Segurança das áreas instáveis para análise 2. ....	133
Tabela 5-3. Fator de Segurança das áreas instáveis para análise 3. ....	134
Tabela 5-4. Fator de Segurança das áreas para análise 4. ....	135
Tabela 5-5. Fator de Segurança das áreas instáveis para análise 5. ....	136
Tabela 5-6. Fator de Segurança das áreas instáveis para análise 6. ....	137
Tabela 5-7. Fator de Segurança das áreas instáveis para análise 7. ....	138
Tabela 5-8. Fator de Segurança das áreas instáveis para análise 8. ....	139
Tabela 5-9. Fator de Segurança das áreas instáveis para análise 9. ....	140
Tabela 5-10. Fator de Segurança das áreas instáveis para análise 10. ....	141
Tabela 5-11. Fator de Segurança das áreas instáveis para análise 11. ....	142
Tabela 5-12. Fator de Segurança das áreas instáveis para análise 12. ....	143
Tabela 5-13. Fator de Segurança das áreas instáveis para análise 13. ....	144
Tabela 5-14. Fator de Segurança das áreas instáveis para análise 14. ....	145
Tabela 5-15. Fator de Segurança das áreas instáveis para análise 15. ....	146
Tabela 5-16. Fator de Segurança das áreas instáveis para análise 16. ....	147
Tabela 5-17. Fator de Segurança das áreas instáveis para análise 17. ....	148
Tabela 5-18. Fator de Segurança das áreas instáveis para análise 18. ....	149
Tabela 5-19. Tabela-resumo dos Fatores de Segurança com base em parâmetros geotécnicos retroanalizados. ....	150
Tabela 5-20. Tabela-resumo dos Fatores de Segurança com parâmetros geotécnicos reais. ....	151
Tabela 5-21. Classes representativas de declividades agrupadas em polígonos. ....	153

Tabela 5-22. Classes de Fator de Segurança agrupadas em polígonos. ....	156
Tabela 5-23. Áreas afetadas por cada intervalo de classe de Fator de Segurança.....	163

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1-1. Características da carta topográfica (IGM, 2009).....	22
Quadro 2-1. Sequência estratigráfica regional. Unidades e descrições conforme DINAGE (2001).....	44
Quadro 2-2. Clima característico da região de Mazar (Barrero, 1989 <i>apud</i> CELEC, 2011). ....	55
Quadro 3-1. Classificação simplificada dos movimentos de massa segundo Varnes (1978). ....	60
Quadro 3-2. Fatores deflagradores dos movimentos de encosta (VARNES, 1978). ....	65
Quadro 3-3. Agentes promotores de escorregamentos e as propriedades físicas envolvidas. ....	68
Quadro 3-4. Escala Richter (1935) – Escala de Magnitude.....	72
Quadro 3-5. Escala Mercalli Modificada (1956) – Escala de Intensidade. ....	73
Quadro 3-6. Coeficiente sísmico horizontal ( $K_h$ ) em função do PGA. ....	75
Quadro 3-7. Valores de aceleração definidos para análise pseudo-estática da área de estudo. ....	78
Quadro 3-8. Fatores de Segurança em uma análise estática. ....	83
Quadro 3-9. Fatores de Segurança para análise pseudo-estática em Mazar. ....	84
Quadro 4-1. Horizontes interpretados por sísmica de refração. ....	95
Quadro 4-2. Características do deslizamento Osomache Norte. ....	97
Quadro 4-3. Características do deslizamento Osomache. ....	98
Quadro 4-4. Características do deslizamento Santa Rita. ....	99
Quadro 4-5. Características do deslizamento Tubán.....	100
Quadro 4-6. Características do deslizamento Osoyacu. ....	101
Quadro 4-7. Características do deslizamento Ñuñurcu. ....	102
Quadro 4-8. Características do deslizamento Llamacón. ....	103
Quadro 4-9. Características do deslizamento Chalacay.....	104
Quadro 4-10. Características do deslizamento de Quebrada Honda. ....	105
Quadro 4-11. Características do deslizamento Las Palmas. ....	106
Quadro 4-12. Características do deslizamento Las Juntas. ....	107
Quadro 4-13. Atividades dos escorregamentos.....	108
Quadro 4-14. Ensaios de caracterização executados. ....	110
Quadro 4-15. Propriedades geotécnicas de solos segundo Classificação SUCS.....	115
Quadro 4-16. Exemplo de cálculo de mergulho aparente de descontinuidade em relação à encosta. ....	123
Quadro 5-1. Condições de avaliação do Fator de Segurança.....	130
Quadro 5-2. Critérios analisados para cálculo de Fator de Segurança. ....	130
Quadro 5-3. Fluxograma de atividades para determinação de Fator de Segurança.....	131
Quadro 5-4. Análises de Fator de Segurança espacializadas: parâmetros retroanalizados.....	156
Quadro 5-5. Análises de Fator de Segurança espacializadas: parâmetros reais.....	156
Quadro 6-1. Percentual médio de contribuição da água no Fator de Segurança. ....	172
Quadro 6-2. Percentual médio de contribuição da aceleração sísmica no Fator de Segurança. ....	172

## LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATÓES E NOMENCLATURAS

A	- Área, em m <sup>2</sup>
ABGE	- Associação Brasileira de Geologia de Engenharia
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>apud</i>	- Do latim: “conforme” ou “segundo”, referindo-se à idéia de um autor mencionado na obra de outro
c	- Coesão, em kPa ou kg/cm <sup>2</sup>
c'	- Coesão efetiva, em kPa ou kg/cm <sup>2</sup>
CGM	- Consórcio Gerência Mazar
CGT	- <i>Centro di Geotecnologie</i>
$\delta$	- deslocamento
E <sub>d</sub>	- espaçamento entre juntas, em (m)
ESRI	- <i>Environmental Systems Research Institute, Inc.</i>
<i>et al.</i>	- Do latim: “e outros”, para publicações que tenham mais de três autores
F <sub>a</sub>	- Força de atrito
f <sub>d</sub>	- Frequência de descontinuidades
F <sub>p</sub>	- Força de percolação exercida pela água no solo
FS	- Fator de Segurança ou Coeficiente de Segurança (adimensional)
$\phi$	- Ângulo de atrito interno, em (°)
$\phi'$	- Ângulo de atrito interno efetivo, em (°)
$\phi_{\text{pico}}$	- Ângulo de atrito interno máximo ou de pico, em (°)
$\phi_r$	- Ângulo de atrito interno residual, em (°)
g	- Gals, medida de aceleração cuja unidade corresponde a 100m/s <sup>2</sup>
GIS	- <i>Geographic Information System</i>
$\gamma_a$	- Peso específico da água, em kN/m <sup>3</sup>
$\gamma$	- Peso específico, em kN/m <sup>3</sup>
$\gamma_{\text{nat}}$	- Peso específico natural, em kN/m <sup>3</sup>
$\gamma_{\text{sat}}$	- Peso específico saturado, em kN/m <sup>3</sup>
h	- Teor de umidade, em (%)
h <sub>2</sub>	- Altura do nível de água acima do plano de ruptura, em (m)
i	- Ângulo de inclinação das vertentes, em (°)
i <sub>c</sub>	- Ângulo crítico, em (°)
I <sub>d</sub>	- índice de durabilidade do primeiro ciclo

$I_{d2}$	- índice de durabilidade do segundo ciclo
$I_s$	- índice de carga pontual, em MPa
IAEG	- <i>International Association of Engineering Geology</i>
IGM-EC	- <i>Instituto Geográfico Militar del Ecuador</i>
<i>in situ</i>	- Do latim: “no local”
IP	- Índice de Plasticidade, em porcentagem (%)
IPT	- Instituto de Pesquisas Tecnológicas
IQR	- Índice de qualidade da rocha
ISRM	- <i>International Society for Rock Mechanics</i>
JCS	- coeficiente de resistência à compressão das paredes das juntas
JRC	- coeficiente de rugosidade de juntas
$K_h$	- coeficiente sísmico horizontal, em $m/s^2$
LL	- Limite de Liquidez, em (%)
LP	- Limite de Plasticidade, em (%)
m	- relação de $h_2/Z$ , adimensional
M	- Magnitude de um sismo (Escala Richter)
MDE	- Modelo Digital de Elevação
$\mu$	- Pressão neutra ou poro-pressão
NA	- Nível d’água
OCR	- <i>over consolidation ratio</i>
<i>op. cit.</i>	- Do latim: “ <i>opere citato</i> ”, referindo-se a algo que já foi mencionado
P	- Peso
PDEE	- Programa de Doutorado com Estágio no Exterior
$P_e$	- Peso efetivo
PGA	- <i>Peak Ground Acceleration</i> , em g ou $m/s^2$
Pseni	- Decomposição tangencial da força R
Pcosi	- Decomposição normal da força R
R	- Forças de resistência ao cisalhamento
RMR	- <i>Rock Mass Rating</i>
RQD	- <i>Rock Quality Designation</i>
RSR	- <i>Rock Structure Rating</i>
$\rho$	- Massa específica, em $g/cm^3$ ou $kg/m^3$
$\rho_{nat}$	- Massa específica natural, em $g/cm^3$ ou $kg/m^3$
$\rho_{sat}$	- Massa específica saturada, em $g/cm^3$ ou $kg/m^3$

<i>Stricto sensu</i>	- Do latim: “sentido estreito”, ou seja, a palavra entendida em seu sentido mais limitado
SUCS	- Sistema Unificado de Classificação de Solos
$\sigma$ ou $\sigma_n$	- Tensão normal
$\sigma_{ne}$	- Tensão normal efetiva
$\sigma_p$	- Pressão de percolação
$\sigma_{pe}$	- Pressão de percolação efetiva
$\sigma_v$	- Tensão vertical
$\sigma_{ve}$	- Tensão vertical efetiva
$\sigma_s$	- Tensão cisalhante
$\sigma_{se}$	- Tensão cisalhante efetiva
$\tau$	- Força de resistência ao cisalhamento, em kPa
$T_r$	- índice de persistência
UHE	- Usina Hidroelétrica E
UNESCO	- <i>United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization</i>
UNISI	- <i>Università degli Studi di Siena</i>
UTM	- <i>Universal Transverse Mercator</i>
Z	- Profundidade do plano de ruptura, em (m)

## **ABSTRACT**

BORCHARDT, N. (2012). *Analysis of slope stability by backcalculation on the Paute River: application to constructive studies of Hydroelectric Mazar - Ecuador*. 178p. Dr. (Thesis). Department of Geology, Federal University of Paraná. Curitiba, 2012.

The study area is located in the Andes Cordillera in the central-south of the Equator, and corresponds to a portion of the middle course of the river basin Paute, formed in a narrow valley nestled at about 2,000 m altitude, where is deployed the Mazar hydropower plant. Along its course are observed many landslides slopes, including the historic case called "La Josefina" which in 1993 moved a volume of soil and rock estimated at 25 million of m<sup>3</sup>. For the construction of a large engineering project in this geological context characterized by many natural instabilities is essential to identify the areas of lowest and highest risk. Furthermore, in order to obtain satisfactory results in timely with reduced costs, the use of backcalculation methods and techniques of geoprocessing are facilitators tools. In this aspect, the form of geotechnical characterization of massives of soil and rock, and the analysis of their stability proposed this thesis are meeting those needs. The strength parameters of colluvium soils and rock horizon that form more superficially the slopes bordering the hydroelectric reservoir, were determined by backcalculation and, to attest the reliability of the results, were compared with literature values. The safety factor (FS) was calculated simulating degrees of saturation of the ground, as a function of oscillation of the groundwater level in regions above the reservoir, therefore, not submerged. It was also evaluated the seismic contribution applying acceleration coefficient  $K_h$  of 0.14g and another overestimated ( $K_h = 0.28g$ ). The spacialization of the Factors of Safety, through geoprocessing, resulted in maps of guidance character about the areas of lesser and greater stability for each simulated situation, given the proposed work.

Keywords: AndesCordillera , Safety Factor, backcalculation.

## RESUMO

BORCHARDT, N. (2012). *Análise da estabilidade de taludes por retroanálise do rio Paute: aplicação nos estudos construtivos da Usina Hidroelétrica Mazar – Equador*. 178p. Dr. (Tese). Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

A área de estudo localiza-se na Cordilheira dos Andes, na região centro-sul do Equador, e corresponde a uma porção do médio curso da bacia hidrográfica do rio Paute, conformado em um vale estreito e encaixado a cerca de 2.000m de altitude, onde está implantada a usina hidroelétrica Mazar. Ao longo de seu curso são observados muitos escorregamentos de encosta, incluindo o caso histórico denominado “*La Josefina*” que em 1993 moveu um volume de solo e rocha estimado em 25 milhões de m<sup>3</sup>. Para a construção de uma obra de engenharia de grande porte neste contexto geológico caracterizado por tantas instabilidades naturais é fundamental identificar as áreas de menor e maior risco. Além disso, para que se obtenham resultados satisfatórios em tempo hábil e a custos reduzidos, a utilização de métodos de retroanálise e técnicas de geoprocessamento são ferramentas facilitadoras. Neste aspecto, a forma de caracterização geotécnica dos maciços de solo e rocha e a análise de sua estabilidade, proposta nesta tese, vêm de encontro a tais necessidades. Os parâmetros de resistência dos solos coluvionares e do horizonte de rocha que compreendem mais superficialmente as encostas que margeiam o reservatório da hidroelétrica, foram determinados por retroanálise e, para atestar a confiabilidade dos resultados, comparou-os com valores de literatura. O Fator de Segurança (FS) foi calculado simulando graus de saturação do terreno em função da oscilação do nível freático nas regiões acima do reservatório, portanto, não submersas. Avaliou-se ainda a contribuição sísmica aplicando-se coeficientes de aceleração  $K_h$  de 0,14g) e outro superestimado ( $K_h = 0,28g$ ). A espacialização de Fatores de Segurança, por meio de geoprocessamento, resultou em mapas de caráter orientativo quanto às zonas de menor e maior estabilidade para cada situação simulada, atendendo ao proposto no trabalho.

Palavras-chave: Cordilheira dos Andes, Fator de Segurança, retroanálise.



## INTRODUÇÃO

Atualmente, as usinas hidrelétricas deixaram de ser propriedades exclusivas do governo. Qualquer pessoa que queira construir uma e tenha condições, pode fazê-lo obedecendo aos regimes legais. Isso significa que o proprietário, na maioria das vezes, tem um perfil muito mais empreendedor e desconhece os agravantes geológico-geotécnicos que estão envolvidos numa obra de tamanha magnitude. O interesse imediato é com o lucro, expresso na cobrança pelo término da obra em tempo hábil bastante reduzido dentro do qual não é possível, muitas vezes, analisar criteriosamente os maciços rochosos e aplicar conceitos e métodos de caráter preventivo de acidentes.

No Brasil, a preocupação com estudos mais minuciosos do comportamento de maciços rochosos frente à intervenção de obras de engenharia de grande porte, como é o caso das estruturas que envolvem uma usina hidrelétrica, remonta à década de 60 e 70 quando houve um *boom* na construção de grandes barragens. O legado técnico daquele período solidificou a Geologia de Engenharia como ciência e tem sido, até hoje, a base que norteia as obras atualmente em andamento, como bem observado em trabalhos como o de Cruz (1996) e Hudson e Harrison (1997). Desde então, muitas foram as metodologias desenvolvidas em todo o mundo para caracterizar e classificar os maciços rochosos, dentre as quais destacam-se os modelos de Bieniawski (1973), Barton *et al.* (1974), e do IPT (1984).

Vale lembrar que por mais que se tente compreender exhaustivamente o caráter geológico-geotécnico dos maciços rochosos em questão, ainda assim se deve contar com a

possibilidade do imprevisível, uma vez que o objeto de estudo não é de todo dominado pela ciência e a margem de risco está sempre presente. Como exemplo de obras construídas com acuracidade, mas que foram surpreendidas por acidentes graves, tem-se as barragens de *Bouzey* (França, 1895), *Gleno* (Itália, 1923), *St. Francis* (EUA, 1928), *Malpasset* (França, 1959), *Vajont* (Itália, 1963), *Teton* (EUA, 1975), Orós (Brasil, 1960) e Euclides da Cunha (São Paulo, 1977).

## 1.1 JUSTIFICATIVA

No campo de atuação da Geologia de Engenharia, apesar do vasto conhecimento científico, os fatores tempo e dinheiro muitas vezes regem tomadas de decisões técnicas, cobradas em prazos enxutos e com base em poucas informações. Isso pode acarretar em problemas que poderiam ser evitados caso os critérios científicos nortegassem as ações construtivas de forma responsável.

Por isso, em se tratando de análise de estabilidade de encostas no ramo de hidroenergia, ferramentas ágeis e de baixo custo que permitam diagnosticar o risco à instabilidade mediante a simulação de alguns fenômenos naturais, podem ser de grande auxílio para a definição do local mais seguro para a implantação de um projeto.

Neste propósito, o presente estudo apresenta um método para cumprir tais metas mediante análise simulada em geoprocessamento do comportamento dos taludes frente à variação do grau de saturação, controlado por águas pluviais, e da atuação sísmica. O método não dispensa inspeções de campo, ensaios *in situ* ou em laboratório, nem tampouco o parecer de profissionais experientes. No entanto, trata-se de uma proposta de definição de áreas de maior e menor estabilidade na região visada para um projeto, capaz de orientá-lo sem onerar custos ou demandar muito tempo.

Esta hipótese foi aplicada na análise das encostas localizadas ao longo do reservatório da barragem da usina hidroelétrica Mazar, no Equador, e é apresentada no presente trabalho.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste estudo é determinar o Fator de Segurança de encostas de maciços terrosos e rochosos (FS) para diferentes graus de saturação e expostos a situações estáticas (sem ação sísmica) e dinâmicas (com ação sísmica), considerando atributos geotécnicos de coesão ( $c$ ) e ângulo de atrito interno ( $\phi$ ) retroanalizados.

A proposta contempla o desenvolvimento de rotina de trabalho em ambiente de geoprocessamento (GIS), gerando mapas de FS para as diferentes situações simuladas, facilitando a interpretação visual dos locais potencialmente instáveis antes mesmo da obra ser implantada.

Para que os objetivos acima sejam alcançados, é necessário algumas informações precedentes, as quais incluem:

- ✓ mapa topográfico base;
- ✓ mapa geológico;
- ✓ caracterização dos processos de escorregamentos atuantes nas vertentes;
- ✓ Modelo Digital de Elevação (MDE);
- ✓ mapa clinográfico;
- ✓ representação cartográfica de cicatrizes de escorregamentos;
- ✓ ensaio em laboratório.

Para validar os parâmetros geotécnicos retroanalizados ( $c$  e  $\phi$ ), uma opção é compará-los com os resultados de ensaios ou com a classificação de maciços aplicada em campo.

Por fim, a confiabilidade de um método determinístico para calcular o FS seria alcançada quando os resultados dos valores retroanalizados coincidissem com o comportamento real do maciço exposto às mesmas circunstâncias simuladas. Esta correlação seria possível por meio de um monitoramento constante do nível freático da região juntamente com a leitura dos sismógrafos locais e a observação da dinâmica das encostas.

Infelizmente as áreas mais instáveis tornam-se evidentes após os escorregamentos deflagrarem, quando não é mais possível adotar ação remediadora.

### 1.3 OBJETO


O local de aplicação deste estudo compreende as encostas localizadas ao longo e acima do nível do reservatório do Projeto Hidroelétrico Mazar inserido num pequeno trecho da porção média da bacia hidrográfica do rio Paute, na região central do Equador, em plena Cordilheira dos Andes. A realidade da configuração geomorfológica deste contexto andino difere da brasileira e a atividade sísmica é um atributo presente.

### 1.4 MATERIAIS

#### Cartografia básica:

A base topográfica utilizada foi extraída da folha *Taday*, escala 1:50.000 (ver Figura 1-1), fornecida pelo *Instituto Geográfico Militar del Ecuador* (IGM-Ecuador, 1969), cujos detalhes estão no Quadro 1-1.

**Quadro 1-1.** Características da carta topográfica (IGM-Ecuador, 1969).

<b>INFORMAÇÃO DO PRODUTO</b> <b>Carta Topográfica: <i>Taday</i> (Cola de San Pablo)</b> <b>Escala 1:50.000 (CT-ÑV-C4)</b>	
	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Região: Serra e Amazônia</li> <li>• Província: Azuay-Cañar-Moroña Santiago</li> <li>• Coordenadas Geográficas: Latitude: S2°40'/S2°30' e Longitude: W78°45'/W78°30'</li> <li>• Coordenadas Planas UTM (aproximadas): Norte: 9.705.010/9.723.400 e Leste: 750.170/778.020</li> <li>• Código Internacional: 3886-II</li> <li>• Edição: 1969</li> <li>• Idioma: Espanhol</li> <li>• Descrição Geral: Para orientação geral e desenvolvimento de projetos.</li> <li>• Orografia: Apresenta relevo irregular, com altitude máxima de 3.757m, ponto este localizado no extremo noroeste da carta. A Cordilheira de Allcu Quiru é o acidente orográfico mais significativo do setor.</li> <li>• Cotas extremas: 1.400m a 3.757m</li> <li>• Hidrografia: Existem vários sistemas hidrográficos, destacando-se o rio Paute com seu principal afluente, o rio Mazar, que a montante recebe também uma série de formadores. Na parte sudeste estão os rios Dudas, Macas e La Ramada.</li> <li>• Cidades e Povoados: Pindilig, Taday, San Juan, Amaluza, Shoray, Tres Palmas, Tordel, Manzanapata, Asunción Dudas, Huarainac, Chagalpud, Shall, Santa Teresita, Hualapán Rumirachi e Puchún são os lugares povoados existentes na carta.</li> <li>• Rede viária: Composta por caminhos de duas ou mais vias com revestimento solto, transitável em todo tempo, além de caminhos transitáveis apenas em tempo bom ou seco.</li> <li>• Datum: SULAMERICANO 1956</li> <li>• Tamanho: 40cm x 60cm</li> <li>• Equidistância: curvas de nível a cada 40m, com auxiliares a cada 20m.</li> <li>• Cobre aproximadamente 18,4km x 27,9km, representando uma superfície total em torno de 513km<sup>2</sup>.</li> <li>• Quadricula: 2cm x 2cm, representando 1km<sup>2</sup> no terreno.</li> </ul>	



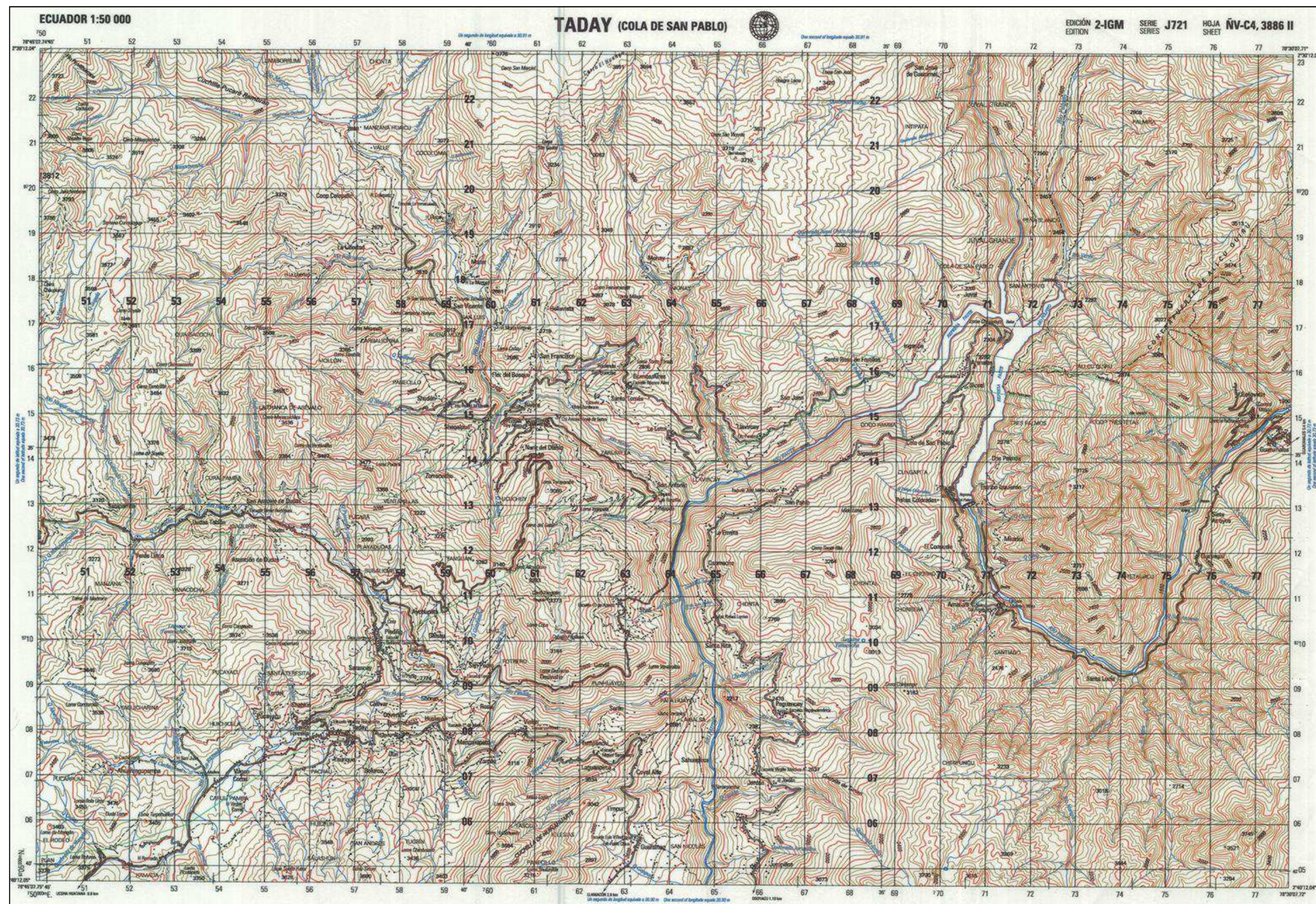


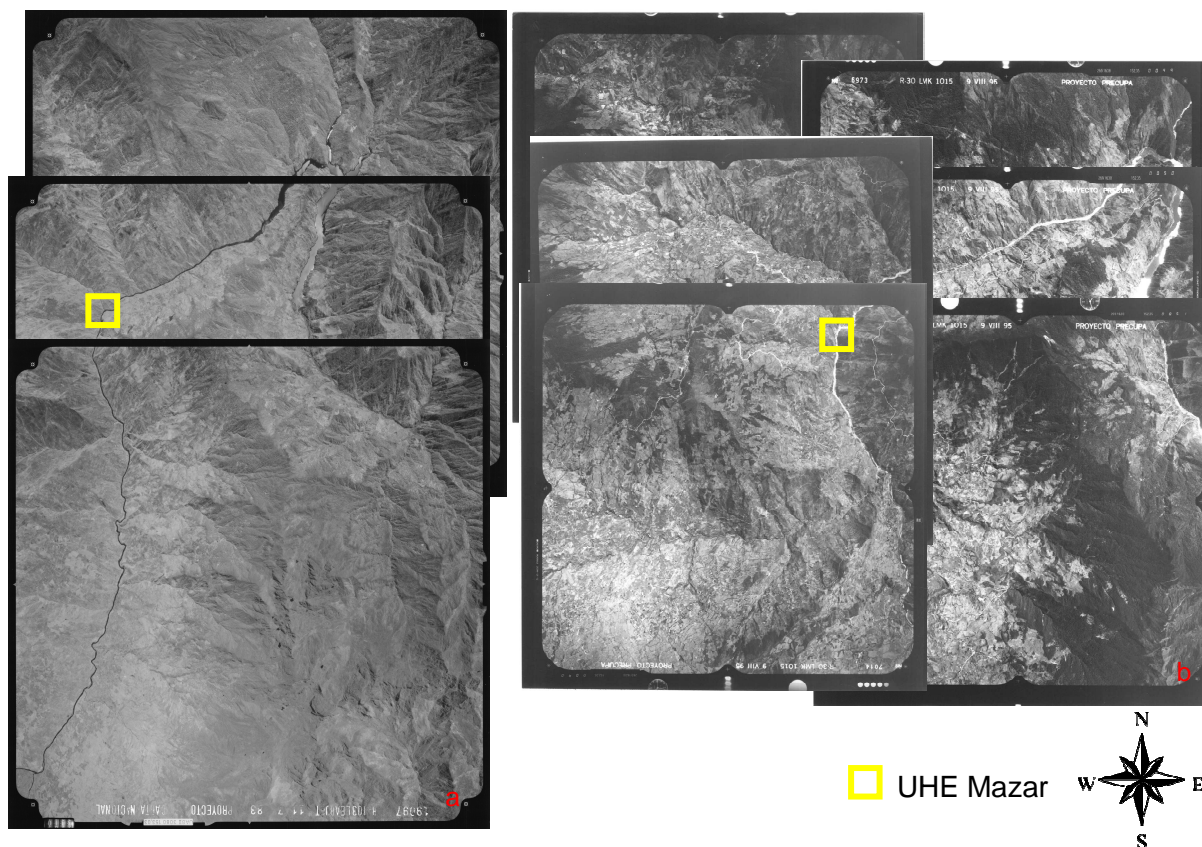
Figura 1-1. Carta topográfica Taday (Cola de San Pablo), escala 1:50.000.

Fonte: IGM-Ecuador (1969)



**Produtos de sensoriamento remoto:**

Utilizaram-se fotos aéreas pancromáticas datadas de 1983, escala 1:60.000 (Figura 1-2a); e outras do ano de 1996, escala 1:20.000 (Figura 1-2b), ambas pertencentes ao *Instituto Geográfico Militar del Ecuador* (IGM) e elaboradas para projetos distintos.



**Figura 1-2.** a) Mosaico das fotos aéreas de 1983, escala 1:60.000. Numeração das fotos: 19095, 19096 e 19097.  
b) Mosaico das fotos aéreas de 1996, escala 1:20.000. Numeração das fotos: 6973, 6974, 6975, 7014, 7015 e 7016.

*Fonte: IGM-Ecuador, Proyecto Carta Nacional (1983) e Proyecto Precupa (1996)*

**Softwares:**

Os programas computacionais específicos necessários para o desenvolvimento do trabalho foram:

- ✓ *ArcMap*;
- ✓ *Erdas*®, versão 9.1;
- ✓ *AutoCad*;
- ✓ *Microsoft*®Office.

## 1.5 ETAPAS EXECUTIVAS

Os trabalhos se desenvolveram em etapas, respeitando a seguinte ordem:

- ✓ 1ª. Etapa: atividades de escritório;
- ✓ 2ª. Etapa: atividades de campo;
- ✓ 3ª. Etapa: compilação de ensaios;
- ✓ 4ª. Etapa: aprimoramento de tecnologias (bolsa sanduíche);
- ✓ 5ª. Etapa: aplicação do método.

### 1.5.1 PRIMEIRA ETAPA: ATIVIDADES DE ESCRITÓRIO

A primeira etapa consistiu em pesquisa bibliográfica referente ao tema proposto nesta tese e aos tópicos correlacionados, expostos em capítulos específicos para elucidar conceitos e facilitar entendimento do leitor. Estes tópicos abrangem a gênese da Cordilheira Andina, a qual é determinante das características geomecânicas analisadas; a descrição regional da área de estudo; e por fim a análise da estabilidade de taludes.

### 1.5.2 SEGUNDA ETAPA: ATIVIDADES DE CAMPO

Esta etapa compreendeu uma viagem de 30 dias de permanência na UHE Mazar com intuito de determinar o local específico a ser estudado segundo critérios de acessibilidade e ocorrência de riscos geotécnicos. Em campo, foram observados e caracterizados os indícios de movimentação de massa, elaborado arquivo fotográfico e obtidos dados geoestruturais e tectônicos (falhas, contatos, fraturas, xistosidades, atitudes, caracterização geomecânica). Além disto, neste período foi disponibilizado diretamente pelo Consórcio Gerência Mazar – CGM os dados de cunho geológico-geotécnicos levantados durante as fases de elaboração do projeto, como mapas, dados sísmológicos e inventário descritivo das zonas instáveis de alta periculosidade, cujas informações tornaram-se ferramentas imprescindíveis para o desenvolvimento dos trabalhos.

No tocante às informações pertinentes à influência dos terremotos na análise de

estabilidade de encostas, estas foram compiladas da literatura disponibilizada pelo Consórcio Gerência Mazar.

### 1.5.3 TERCEIRA ETAPA: COMPILAÇÃO DE ENSAIOS

O Consórcio Gerência Mazar dispôs informações de caracterização e classificação dos maciços da região com as quais montou-se o banco de dados referente aos atributos geomecânicos mensurados *in situ* e em laboratório. Tais informações foram importantes para fins de comparação com os resultados de retroanálise e validação do método.

### 1.5.4 QUARTA ETAPA: APRIMORAMENTO DE TECNOLOGIAS

Como aprimoramento de tecnologias enquadram-se os estudos realizados no *Centro di GeoTecnologie* (CGT) da *Università degli Studi di Siena* (UNISI), na Itália, no período compreendido entre Dez/2008 e Maio/2009. O conhecimento adquirido neste Programa de Doutorado com Estágio no Exterior (PDÉE), relativo à técnica de fotogrametria digital, ferramentas de uso de sensoriamento remoto, geoprocessamento, GPS, estudos geotécnicos e análise de estabilidade de vertentes em solo e rocha, permeia, de alguma forma, os capítulos desta tese.

### 1.5.5 QUINTA ETAPA: APLICAÇÃO DO MÉTODO

Esta etapa compreendeu a aplicação de um método para determinar, por meio de retroanálise, o Fator de Segurança das encostas ao longo do reservatório da usina hidroelétrica Mazar e espacializá-lo em mapas.

As análises simularam diferentes graus de saturação das encostas para os horizontes situados acima dos planos potenciais de escorregamento: 1%, 50% e 100%. Também se consideraram duas hipóteses de ação sísmica: com sismo de  $0,14\text{cm/s}^2$  proposto pelo projeto, e outro superestimado de  $0,28\text{cm/s}^2$ ; além de uma análise estática, ou

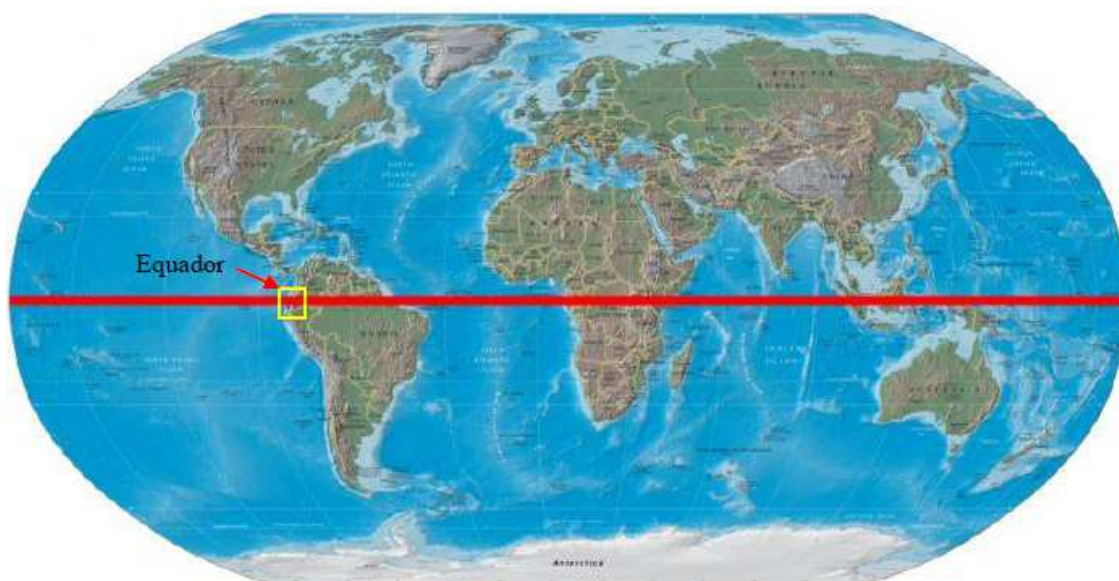


seja, sem sismo, para avaliar a influência desta variável na estabilidade das encostas. Dos parâmetros geotécnicos, a coesão foi considerada em alguns casos igual à zero e, em outros, igual ao valor real obtido em laboratório. Uma vez concluídos os mapas gerados pela variação dos atributos acima descritos, estes foram analisados, resultando nas discussões e respectivas conclusões apresentadas ao final deste trabalho.

### ASPECTOS GERAIS

A área de estudo pertence à República do Equador, país da América do Sul com área um pouco menor que a do estado brasileiro do Rio Grande do Sul. Localiza-se sobre a linha equatorial terrestre, à latitude zero, tendo porções de seu território nos hemisférios Norte e Sul. Faz divisa com as seguintes unidades geopolíticas: ao Norte com Colômbia, a Leste e Sul com Peru, e a Oeste é margeada pelas águas do Pacífico (Figura 2-1).

Compreende dois espaços distintos: o território continental, incluindo algumas ilhas próximas à costa; e outro composto pelo Arquipélago de Galápagos, no Oceano Pacífico, distante 960km da costa continental.



**Figura 2-1.** Localização da República do Equador no Mapa Mundi - 2010.

*Fonte: Aquimapas (2010)*

## 2.1 GÊNESE ANDINA

A Cordilheira dos Andes, por ser o mais expressivo divisor de águas da América Latina e a coluna dorsal do Equador, tem fundamental importância na conformação dos terrenos deste país. Assim, é imprescindível primeiramente caracterizá-la para depois descrever as unidades fisiográficas que compõem a área de estudo.

O Equador continental encontra-se em uma zona onde a convergência das placas tectônicas Nazca e Sul-americana gera um processo de subducção **(Erro! Auto-referência de indicador não válida.)**.

A Placa de Nazca se forma a partir da Cordilheira submarina do Pacífico Oriental e é empurrada em direção ao oriente a uma velocidade superior a 6cm/ano (Kellogg e Vega, 1995).

Por outro lado, a Placa Sul-americana se forma na cordilheira submarina centro-oceânica do Atlântico médio e é empurrada para oeste a uma velocidade de aproximadamente 3cm/ano (Barazangi e Isacks, 1976).

O choque entre as placas é responsável pelo surgimento de uma fossa tectônica localizada ao longo da linha da costa pacífica fora do continente (Figura 2-3), e pelo soerguimento do território continental materializado por duas cadeias montanhosas, a



lucção.  
JALG (2011)

Cordilheira Ocidental e Real, que juntas conformam a Cordilheira dos Andes e controlam a existência de 3 zonas fisiográficas claramente definidas desde o Oeste até o Leste, chamadas Costa, Serra e Oriente, como mostra a Figura 2-4, tendo cada uma um microclima, fauna e flora característicos.



das placas tectônicas.

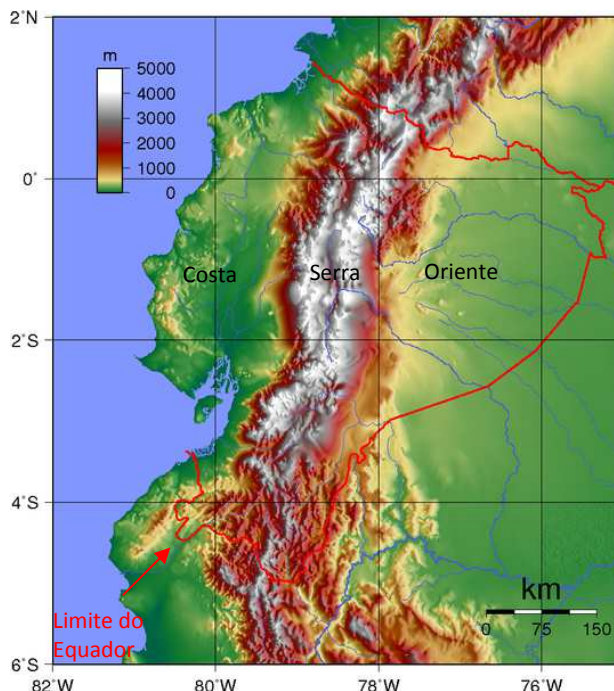
Fonte: [www.sangay.com](http://www.sangay.com) (2011)

### 2.1.1 ZONAS FISIAGRÁFICAS DO EQUADOR

#### **Serra:**

É caracterizada pela Cordilheira dos Andes ou arco vulcânico, formada pelas cordilheiras paralelas Ocidental e Real, as quais confinam um estreito vale que constitui o chamado Vale Interandino, ao longo da qual se estendem bacias intra-montanhas. Estende-se de norte a sul do país, dividindo-o em duas partes: a Costa e o Oriente. Tem grande altitude, com alguns picos acima de 6.000m, muitos dos quais formados por vulcões ativos (Figura 2-5a e b). Sobre a

Cordilheira Andina assentam algumas das mais importantes cidades do país, como a capital Quito, além de Cuenca e Riobamba.



**Figura 2-4.** Zonas fisiográficas do Equador.

*Fonte: Wikipedia (2011)*

#### **Costa:**

É onde se formam as bacias de ante-arco. Localiza-se a oeste do país, no litoral, com terrenos quase planos e de baixa altitude próprios para o cultivo de café e cana-de-açúcar. Nesta região encontra-se a maior cidade do país, a portuária Guayaquil. Com suas praias ao longo da “rota do sol”, a costa atrai turistas nas épocas mais quentes e oportuniza o espetáculo do pôr do sol no horizonte do Pacífico (Figura 2-5c).

#### **Oriente:**

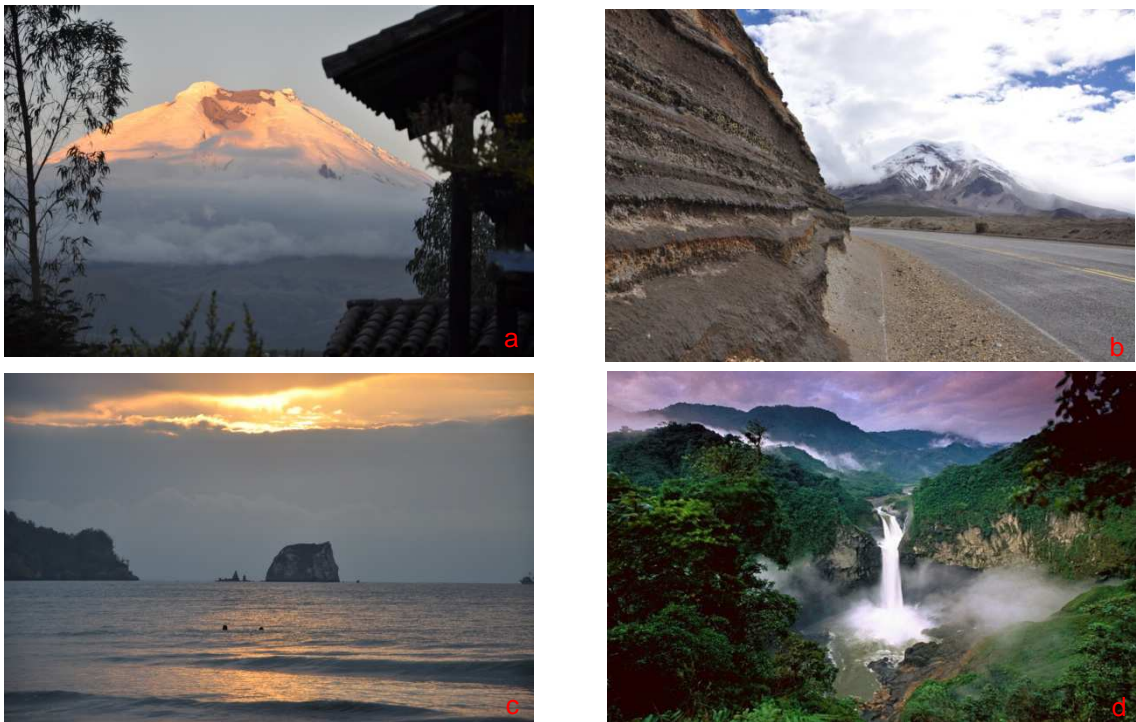
É onde se encontra a Bacia Oriente ou de pós-arco, caracterizada pela Amazônia. Localizado a leste, em plena selva amazônica, com umidade e clima característicos de floresta tropical: úmido e quente (Figura 2-5d).



**Galápagos:**

Além das unidades continentais, o Equador tem em alto mar o arquipélago de Galápagos, sua maior atração turística e centro de pesquisas. Por sua diversidade biológica, tornou-se alvo de teorias científicas como a sustentada pelo pesquisador britânico Charles Darwin. Galápagos (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) foi decretada patrimônio da humanidade pela UNESCO.

O contraste entre as diferentes zonas fisiográficas pode ser visto nas fotos abaixo.



**Figura 2-5. Serra:** vulcões ativos: (a) Cotopaxi e (b) Chimborazo. (c) Costa e (d) Oriente (Amazônia).

Fotos: (a,b,c) autora (2009)



**Figura 2-6.** Em sentido horário: **Galápagos** e fauna característica: tartaruga gigante; leões-marinhos; iguanas; baleia jubarte; fragata e pássaros de patas azuis (Foto: autora, 2009).

## 2.2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS

A área de estudo localiza-se na região centro-sul do Equador, distante cerca de 125km da cidade de Cuenca, capital do departamento de Azuay, fazendo divisa com Cañar. Compreende um trecho da bacia hidrográfica do rio Paute delimitado por 4 sub-bacias: Pindilig, Mazar, Paute e Magdalena, que abrangem o complexo hidroenergético UHE Mazar. É limitada pelas coordenadas UTM 9.733.000 e 9.683.000N; e 740.000 778.000E. Na Figura 2-7a e b tem-se a localização da área em relação ao país e sua inserção na bacia hidrográfica do Rio Paute, respectivamente.



**Figura 2-7.** (a) Localização da área de estudo no país e (b) dentro da bacia hidrográfica do rio Paute.

Fonte: (a) AGC (2011); (b) UAZUAY (2011)

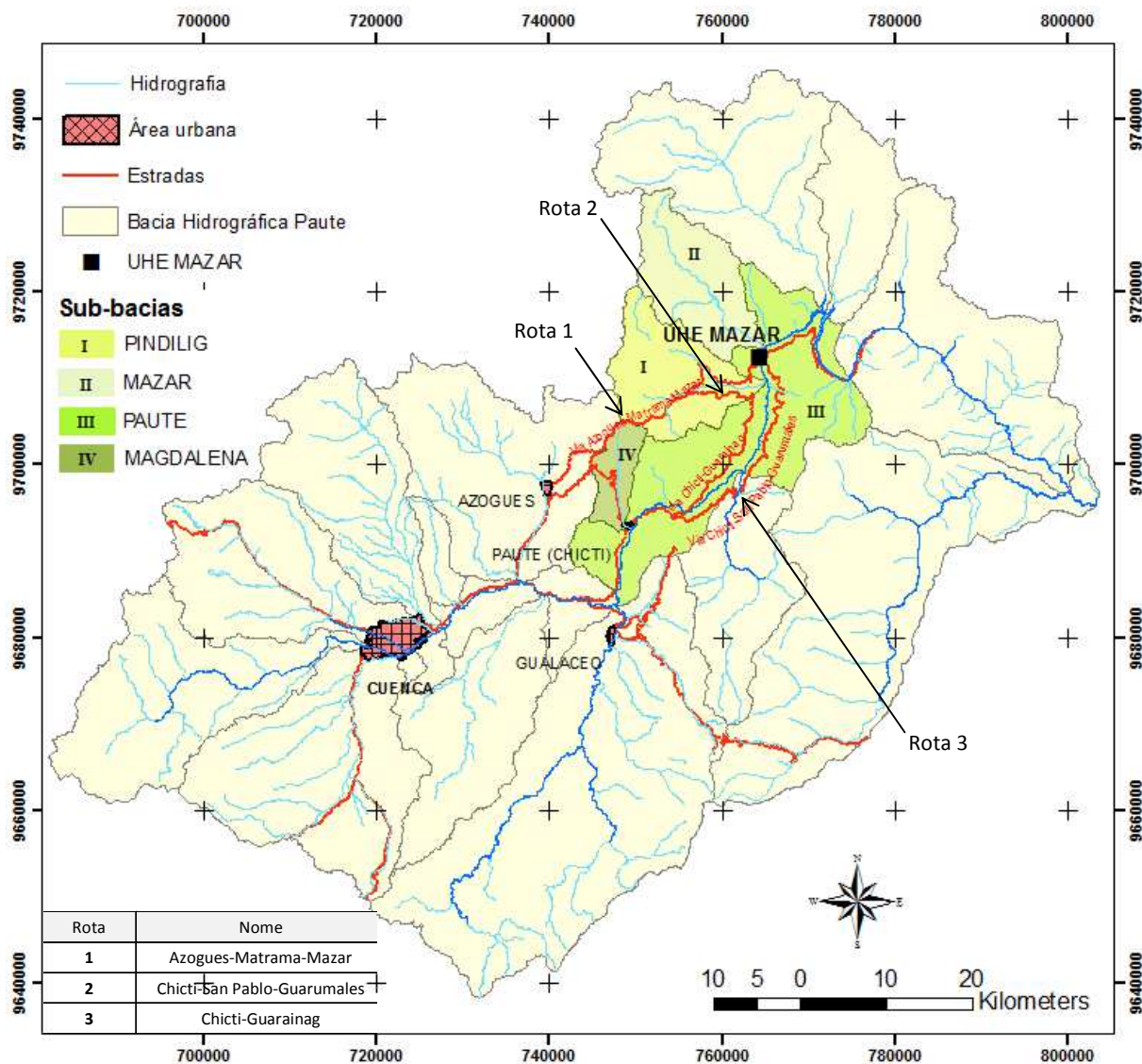
Com respeito às diferentes zonas fisiográficas do Equador, a região faz parte do cenário da Serra, em plena Cordilheira Real. Para se chegar lá, a partir de Cuenca, há três caminhos viáveis, representados na Figura 2-8 juntamente com as sub-bacias.

A rota Azogues-Matrama-Mazar (Rota 1) é a mais recente e foi aberta pelo Exército Equatoriano para ligar Cuenca ao Projeto Mazar. Esta rodovia apresenta as melhores condições de tráfego, menor extensão e menor exposição a áreas propensas a escorregamentos, mas com perigo de rolamento de grandes blocos de rocha. Por esse

caminho, ao aproximar-se do local de estudo, o viajante é surpreendido pela sinuosidade da estrada que leva ao descortinar da mesma paisagem a cada nova curva.

Outra opção é a via Chicti-San Pablo-Guarumales (Rota 2), a qual acompanha o percurso do rio Paute e cruza o povoado *La Josefina*, palco de um grande deslizamento de encosta ocorrido em abril de 1993, cujas cicatrizes geomorfológicas ainda estão latentes no terreno. Por este caminho de altitudes não tão elevadas quanto o anterior, a variação da flora e a abundância de afluentes são um atrativo à parte, fazendo valer a pena percorrê-lo apesar dos riscos iminentes, como a passagem por um túnel escavado em rocha sem tratamento.

Por fim, a via Chicti-Guarainag (Rota 3) é um trajeto para quem prefere arriscar-se por caminhos mais rudimentares, enfrentando trechos não pavimentados e bastante estreitos, expostos a zonas de instabilidade onde escorregamentos fazem parte do cenário.



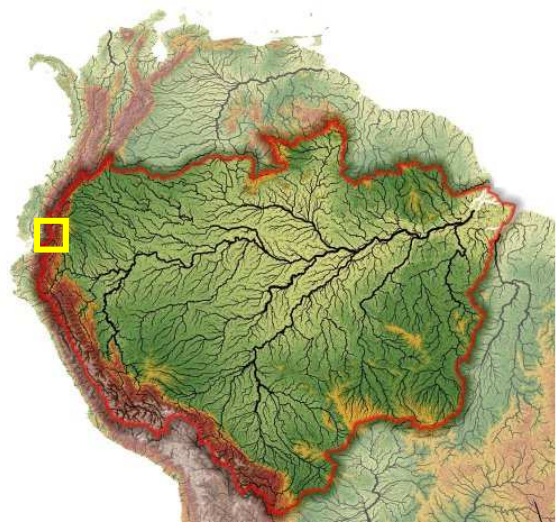
**Figura 2-8.** Bacia hidrográfica do rio Paute, principais acessos à área de estudo e as sub-bacias que a delimitam.

### 2.2.1 BACIA HIDROGRÁFICA

Como bacia hidrográfica assume-se a definição dada por Guerra e Guerra (1997) que considera a mesma como sendo um conjunto de terras drenadas por um rio principal e seus afluentes, com uma hierarquização na rede e um escoamento de água que flui da maior altitude para um ponto menos elevado. Soma-se a esta definição o conceito de que os limites entre bacias são definidos por divisores de água, isto é, elevações topográficas que mudam o sentido do escoamento das águas superficiais.



A bacia hidrográfica do rio Paute nasce em uma porção da Cordilheira dos Andes localizada na região centro-sul do Equador, e é sub-bacia do rio Santiago-Namangoza que, por sua vez, integra a bacia do rio Amazonas, desaguando no Atlântico (Figura 2-9). No âmbito político, em se tratando de um afluente indireto do rio Amazonas, vale explicar que por medidas de proteção do uso compartilhado de recursos naturais, iniciou-se no séc. XX uma



**Figura 2-9.** Localização da Bacia hidrográfica do rio Paute na Bacia Amazônica.

Fonte: WWF

discussão sobre o conceito de bacia de drenagem internacional, firmado na 52ª. Conferência da *International Law Association*, em 1966, resultando nas Regras de Helsinque. Segundo o tratado firmado, “*uma bacia de drenagem internacional é uma área geográfica que cobre dois ou mais Estados, determinada por limites fixados pelos divisores de água, inclusive as águas de superfície e as subterrâneas, que desembocam num ponto final comum*”. Com base neste conceito, não apenas o rio é internacional, mas toda a bacia da qual ele faz parte. Logo, um curso d’água que esteja completamente em território nacional, mas que pertença a uma bacia internacional, também será considerado como tal, e nestes parâmetros enquadra-se o Rio Paute em relação à Bacia Amazônica.

O rio Paute está encaixado no vale andino, serpenteando a sinuosidade da Cordilheira Real, como mostra a Figura 2-10.



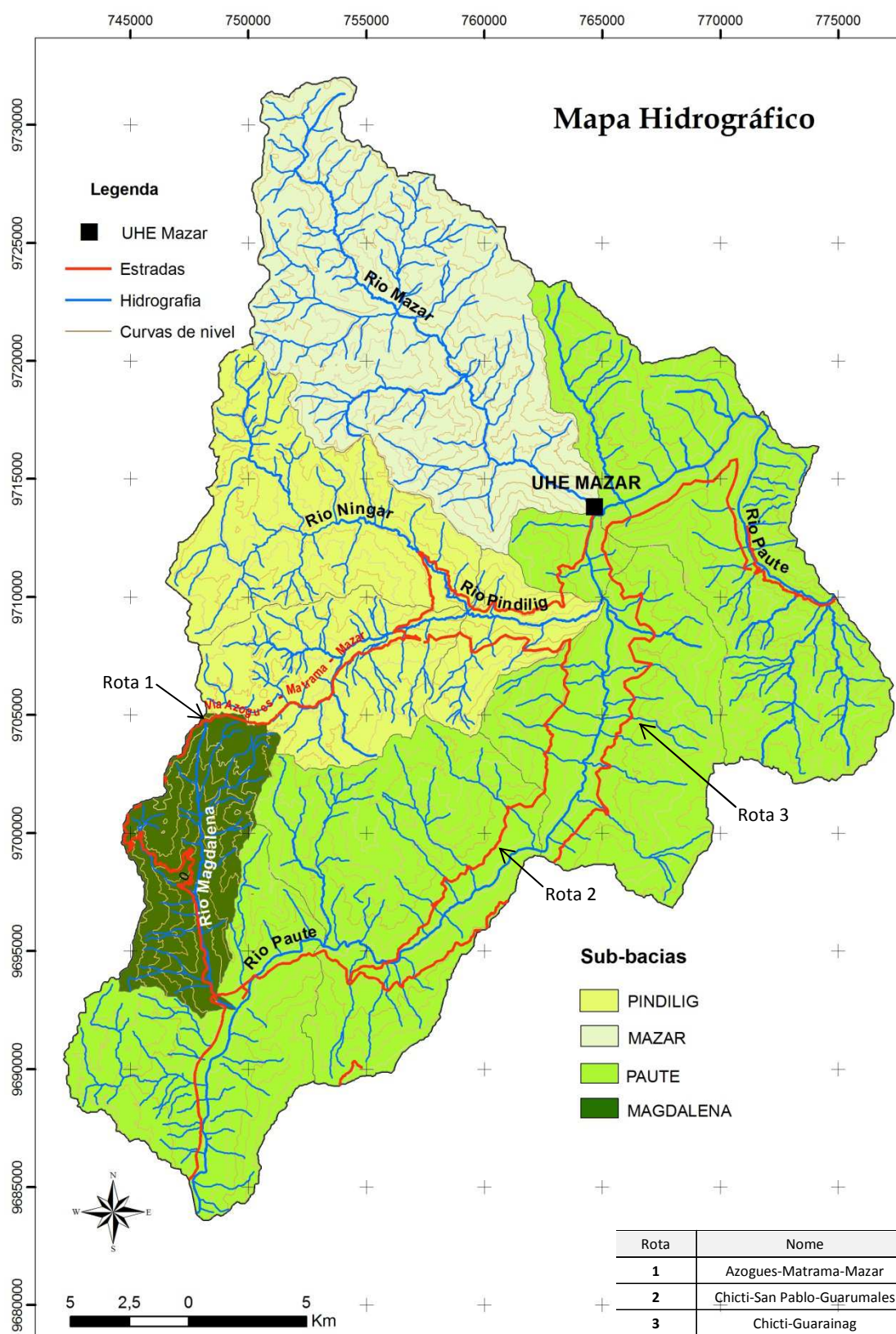
**Figura 2-10.** Aspecto do rio Paute na área de estudo.

*Foto: autora (2008)*

Sua largura média é da ordem de 60m, e a profundidade varia até dezenas de metros, em um curso de água por vezes turbulento nos trechos em que o gradiente torna-se elevado.

Desde a nascente até a região estudada, o rio Paute apresenta direção NNE-SSW e, juntamente com seus afluentes, mantém um arranjo de drenagem do tipo dendrítico, conforme conceito proposto por CRISTOFOLETTI (1974). No entanto, por intervenção estrutural abrupta, sua direção passa a ser praticamente E-W logo após atravessar a área de estudo (UHE Mazar), para então conformar-se no curso dos afluentes da bacia amazônica. O padrão de drenagem altera para subparalelo na sub-bacia Paute nas proximidades com UHE Mazar, fato derivado das características lito-estruturais da região.

Essas características podem ser observadas na Figura 2-11, onde são representadas as quatro sub-bacias que conformam a região.



**Figura 2-11.** Padrões de drenagem das sub-bacias que compõem a área de estudo, e mudança abrupta de direção do rio Paute após UHE Mazar – conforme DINAGE (2001).

## 2.3 GEOLOGIA REGIONAL

Em virtude do processo genético andino já mencionado, a geologia do Equador, e conseqüentemente da bacia hidrográfica do rio Paute, tem uma configuração ativa, jovem, imprevisível e, por vezes, agressiva. A região é palco de atividades sísmicas e vulcânicas freqüentes gerando uma terra em constante transformação. A ocupação antrópica das áreas de maior predisposição a esses eventos agrava os freqüentes desastres naturais, como deslizamentos, avalanches e inundações, podendo levá-los a cifras astronômicas. A seqüência estratigráfica é descrita abaixo e pode ser visualizada no Quadro 2-1.

### 2.3.1 EMBASAMENTO DA CORDILHEIRA DOS ANDES

A bacia hidrográfica do rio Paute orienta-se transversalmente à direção geral da cordilheira. Tem sua origem nos cumes ocidentais, acima de 4.000m de altitude, e desce até a elevação 600m, em sentido à zona subandina do oriente. Neste trajeto as águas drenam diversos terrenos geotectônicos que compõe seu embasamento. A oeste das cidades de Cuenca e Azogues o núcleo da cordilheira é formado somente pela divisão litotectônica denominada Terreno Chaucha (Aspden *et al.*, 1988), e a leste encontram-se os Terrenos Alao, Salado e Loja (Litherland e Zamora, 1991).

O Terreno Salado tem uma largura de cerca de 25km e constitui o embasamento metamórfico mais a leste da Cordilheira dos Andes. Faz contato direto com os sedimentos Cretáceos e Terciários continentais da bacia amazônica através de um sistema de falhas de cavalgamento denominado Frente Subandino, cuja reativação em 1995 produziu sismos entre 5 e 6 na escala Mercalli Modificada, que corresponde a 7% da aceleração da gravidade (Yepes, 1998). Apresenta um arco vulcânico Jurássico e uma correspondente bacia pós-arco, ambos deformados e metamorfizados no momento da colisão com o terreno oceânico Alao. Em conseqüência, compõem-se de rochas metavulcânicas, metassedimentos e rochas intrusivas metamorfizadas.

O Terreno Chaucha é um cinturão metamórfico de aproximadamente 40km de largura que foi acrescido ao continente no período Cretáceo. Não aflora na bacia do rio

Paute por estar coberto por uma espessa série vulcânica e sedimentar do Mioceno. É constituído por rochas metamórficas de alto grau, parte das quais são ardósias e quartzitos que pertencem à Unidade Guamote. Faz limite a oeste com a sutura tectônica Calacalí-Pallatanga–Palenque, e a Leste com a falha tectônica Peltetec (Aspden *et al.*, 1988, Litherland *et al.*, 1994) que serve de contato com os terrenos Alao.

O Terreno Alao é um cinturão metamórfico de aproximadamente 35km de largura, composto por rochas metavulcânicas e metassedimentares pertencentes a um arco insular oceânico que colidiu no Jurássico promovendo o soerguimento e a erosão da Cordilheira Real. É limitado a oeste por uma falha/sutura tectônica regional chamada Peltetec, que representa uma zona de colisão entre terrenos pré-Cretáceos; e a leste pelo contato com o terreno Loja pela Falha Baños (Litherland *et al.*, 1994; Aspden e Litherland, 1997). O Terreno Alao compreende as unidades Peltetec, Maguazo, Alao-Paute e El Pan, estando estas duas últimas na área de estudo.

O Terreno Loja corresponde a um cinturão metamórfico considerado como a espinha dorsal da Cordilheira Real, com aproximadamente 30km de largura. Provém de rochas sedimentares semipelíticas depositadas em bacias sedimentares paleozóicas que foram metamorfizadas durante o Triássico tardio (Egüez e Aspden, 1993). O contato com o terreno Salado, a leste, ocorre pela falha regional Llanganates (Litherland *et al.*, 1994) que cruza pelo setor de Guarumales. As subdivisões deste Terreno são Agoyán e Chiguinda.

#### 2.3.1.1 Bacia Sedimentar

Na região de Cuenca–Azogues–Biblián se estende uma bacia sedimentar conhecida como bacia de Cuenca cuja origem remonta ao Mioceno médio quando, em um ambiente deltaico e marinho salobro, se depositaram sedimentos procedentes da Cordilheira Real (Bristow e Hoffstetter, 1977).

A seqüência iniciou com sedimentos depositados em ambientes fluviais de planície com lentes de canais aluvionais, assim como extensos bancos que, em conjunto, são conhecidos como formação Biblián. Em seguida, a bacia passou a receber sedimentos

cada vez mais finos em um meio de baixa energia, marinho e lacustre. Até o topo da formação a série é cada vez mais arenosa indicando uma subsidência progressiva da bacia.

Sem nenhuma interrupção temporal, a bacia passou a receber sedimentos mais grossos e em ambientes progressivamente mais energéticos; a presença de depósitos turbidíticos corrobora com essa teoria. Um elevado conjunto de materiais vulcânicos em todos estes sedimentos indica que existiu um vulcanismo explosivo contemporâneo. Este conjunto de sedimentos vulcânicos depositados em um ambiente deltaico pertence à Formação Azogues cuja idade remonta ao Mioceno tardio (Steinmann, 1997). Na evolução do processo de sedimentação da bacia, o ambiente converteu-se a um meio deltaico de planície com ocasionais invasões marinhas. O aporte vulcânico foi importante. Frequentes estratos de cinza e piroclastos se alteraram com os depósitos de água salobra, o que indica que existiu um arco vulcânico ativo nesse período.

A bacia de Cuenca foi preenchida com cerca de 2.500m de espessura de sedimentos, e ao finalizar este processo soergueu por esforços orogênicos compressivos que ocasionaram uma intensa deformação agora posta em evidência por dobramentos e deformações dos estratos. Uma vez estabelecida nos níveis atuais, a bacia começou a receber um forte aporte de materiais detríticos grossos depositados em um ambiente fluvial de alta energia. Estes materiais que se originaram nos processos erosivos que começaram a desnudar o segmento ocidental da cordilheira recentemente emergido, correspondem às formações Turi, do Mioceno tardio (Steinmann, 1997).

#### 2.3.1.2 Vulcanismo

Há aproximadamente 26Ma ou 28Ma a placa tectônica chamada Farallón se desfez em duas, Cocos e Nazca. Esta última gerou um processo de subducção e a formação de um novo arco vulcânico calco-alcalino cuja expressão atual são as lavas andesíticas a riolíticas da Formação Saraguro (CODIGEM e BGS, 1993) que se distribuíram ao Ocidente da Cordilheira Real, sobre as bacias soerguidas de Yunguilla e Quingeo, na parte meridional da Cordilheira dos Andes.



No tempo de enchimento da bacia de Cuenca, pelo menos durante a sedimentação da Formação Azogues, houve um vulcanismo explosivo riolítico a dacítico contemporâneo, de origem não identificada. Uma vez produzido o levantamento e a erosão da bacia de Cuenca, novamente se fez presente o vulcanismo. Sobre a Cordilheira Ocidental se instalou um arco vulcânico que hoje é posto em evidência por potentes mantos de lavas de composição andesítica, formado próximo aos centros de emissão. Os litotipos distais se estenderam sobre a bacia de Cuenca como fluxos piroclásticos, *lahares* (fluxos de lama) e avalanches. Estes vulcanismos têm sido agrupados e denominados como Vulcanismos Pisayambo (CODIGEM e BGS, 1993) de idade terciária.

O fim da atividade vulcânica nos Andes meridionais possivelmente foi ocasionado pela diminuição do ângulo de subducção por causa da chegada da Cordilheira de Carnegie há 8Ma (Pilger, 1984) ou 2Ma (Egüez e Aspden, 1993), o que teria impedido o desenvolvimento de um vulcanismo quaternário que, ao contrário, é persistente nos Andes setentrionais. O vulcão quaternário próximo é o Sangay, a 70km a NE do local de estudo.

### 2.3.1.3 Falhas Quaternárias

Além dos sistemas de falhas de sutura que limitam os terrenos metamórficos do embasamento, há outros de idade mais recente e direção média N40E que margeiam a área de estudo e que foram datados por USGS–EPN (2003), os quais são:

#### **Sistema de falhas Girón:**

Corresponde a uma folha normal de direção média 45NE responsável pela formação da bacia intra-montana de Santa Isabel. É considerada ativa com base em evidências morfológicas e estruturais; o sentido de movimento é normal no extremo NW, e dextral a SE. Sua ativação pode alcançar sismos de magnitude 6,8 a 7,1 na escala Richter (Winter *et al.*, 1990 *apud* INECEL, 1982). Segundo Almeida e Ramón (1997), esta falha afeta materiais coluvionares e paleossolos recentes no interior da bacia do rio Paute, nos setores de Azogues e Tarqui.

**Falha Paute:**

Estende-se ao longo do rio Paute e controla a drenagem e a topografia da região.

**Falha Tarqui:**

Trata-se de uma falha relacionada com a extensão sul da Bacia de Cuenca e que afetou os sedimentos vulcânicos do Plioceno.

**Falha Gualaceo:**

Corresponde a uma falha inversa que é o prolongamento sul da Falha Paute. Sua expressão morfológica é a formação de um lineamento com o rio Gualaceo.



**Figura 2-12.** Falhas quaternárias de direção N40E margeando a área de estudo.

*Fonte: INECEL (1982)*

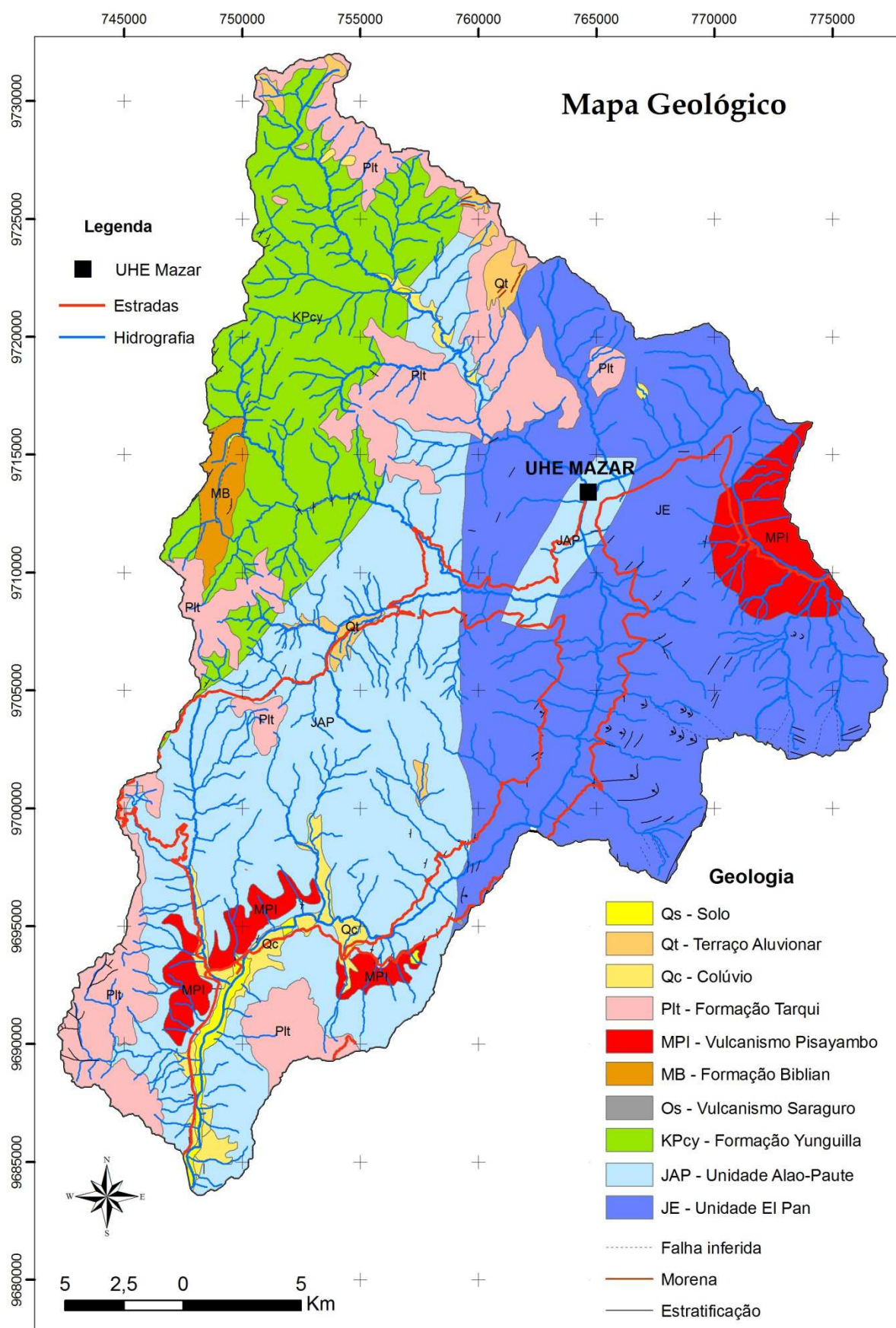
#### 2.3.1.4 Sismos

Em função da convergência das placas tectônicas e a consequente movimentação das falhas existentes, o Equador convive com a sismicidade cotidianamente. O sismo mais devastador decorrente da subducção ocorreu em 5 de agosto de 1949 e afetou principalmente a parte central do país, com seu epicentro na cidade de Ambato, causando aproximadamente 6.000 mortes. Em 1906 ocorreu um sismo de magnitude de 8,8Mw que afetou a região costeira de Esmeraldas, e em função da baixa densidade demográfica não causou grandes perdas humanas. Durante o período de minha permanência na área de estudo, entre abril e maio de 2008, foram sentidos dois sismos de intensidade IV, segundo escala Mercalli Modificada, em função dos efeitos observados.

## 2.4 GEOLOGIA LOCAL


















O embasamento cristalino é constituído basicamente por rochas das unidades Alao-Paute e El Pan, pertencentes ao Terreno Alao, sobre as quais há depósitos sedimentares, intrusões magmáticas e estruturas tectônicas (Mapa Geológico - Figura 2-13).





**Figura 2-13.** Mapa de Unidades geológicas da área de estudo, conforme DINAGE (2001).

**Quadro 2-1.** Sequência estratigráfica regional. Unidades e descrições conforme DINAGE (2001).

Quadro 2-1. Sequência estratigráfica regional. Unidades e descrições conforme DRVAGL (2001).						
ERA	PERÍODO		UNIDADES		DESCRIÇÃO	LEGENDA
CENOZÓICO 65,5 – 0Ma	QUATERNÁRIO 2,6Ma - 0		Depósitos recentes Solos		Areia, argila, colúvio	 Qs
			Terraço Huarainac		Aluvião	 Qh
			Depósito glacial		Tilito	 Qt
	TERCIÁRIO 65,5 – 2,6Ma	NEÓGENO 23 – 2,6Ma	Fm. Turi-Tarqui		Conglomerados, tobas e brechas	 Plt
			Vulcanismo Llacao e Pisayambo		Andesitos Riolitos Piroclastos	 MPI
			Fm. Azogues		Argilas, tobas, arenitos, conglomerados	 MPIa
			Fm. Biblián		Argilitos, Arenitos, Lavas	 MB
		PALEÓGENO 65,5 – 23Ma		Vulcanismo Saraguro		Lavas andesíticas e riolíticas, piroclastos
MESOZÓICO 251 – 65,5Ma	CRETÁCEO 145,5 – 65,5Ma		Fm. Yunguilla		Lutitos, calcáreos, vulcanoclastos	 KPcy
			Granodiorito		Granodiorito	
			Unidade Peltetec		Melanges ofiolíticas	 JKP
	JURÁSSICO 201,6 – 145,5Ma		Terreno Salado		Xistos, mármore, metagrauvacas	 JS
			Terreno Chaucha		Quartzitos, ardósias, xistos	 JC
			Terreno Alao	Unidade Alao-Paute	Metalavas basálticas e andesíticas, filitos e xistos	 JAP
				Unidade Maguazo	Metagrauvacas, metalavas	 JM
				Unidade El Pan	Xistos verdes e negros	 JE
	TRIÁSSICO 251 – 201,6Ma					
	PALEOZÓICO 488 – 251M	PERMIANO 299 – 251Ma				
CARBONÍFERO 359 – 299Ma		Terreno Loja	Unidade Chiguinda	Ardósia, quartzitos	 Pzc	
			Unidade Agoyán	Xistos, gnaisses semipelíticos	 Pza	

#### 2.4.1 LITOLOGIA E ESTRATIGRAFIA

Na sequência estratigráfica exposta no Quadro 2-1, a unidade Alao-Paute ocorre acima da unidade El Pan e o contato é definido por uma mudança lateral de litotipos concordantes. Nas proximidades da área existem vários corpos plutônicos de composição ácida e básica, identificados como intrusivos de Amaluza de idade Cenozóica; além do complexo ultramáfico Tampanchi, stocks vulcânicos e diques encaixados.

### 2.4.1.1 Unidade Alao-Paute (JAP)

Como citado por Guadalupe (2011), esta unidade aflora ao longo dos rios Alao, Paute e Pastaza, entre Gualaceo e Sígsig, e na travessia de Atillo (província de Chimborazo) a Macas (província de Morona Santiago) onde se pode acompanhar e observar a sequência por cerca de 15km (Litherland *et al.*, 1994). Para este autor, os contatos com as demais unidades são tectônicos. O metamorfismo é de alto grau e a litologia compreende lavas metamorfizadas basálticas intercaladas com xistos (quartzíticos, cloríticos, pelíticos, grafíticos), mármore e níveis de rochas andesíticas e metatobas.

A interpretação para esta subdivisão, segundo Litherland *op. cit.*, é que pertence a um arco de ilhas oceânico, com depósitos subordinados sedimentares de águas profundas.

De idade Jurássica, a subdivisão Alao-Paute é composta por duas formações: xistos Tubán e Metavulcânicas São Francisco. Esta última aflora na área de estudo junto às estruturas civis da hidroelétrica Mazar, sendo discriminada em 4 unidades de acordo com a região de ocorrência: La Ermita, Ingapata, La Letra e San Pablo, cobertas por vários depósitos Quaternários de pequena espessura (terraços aluviais antigos, aluvião recente, colúvio, escombros de deslizamento e de deposição). Os contatos entre estas unidades geológicas são do tipo transacional e tem uma direção média N80E concordante com a direção da foliação da rocha, e cortam transversalmente o rio Paute que, no setor, apresenta uma orientação média N10E.

#### **Formação La Ermita:**

É constituída por uma intercalação de horizontes e pacotes de quartzitos, rochas piroclásticas metamorfizadas, metaandesitas e em menor proporção por xistos cloríticos (Figura 2-14). O conjunto apresenta em alguns setores constituindo estratos grossos e maciços de até 1m de espessura, enquanto que em outros existe evidente



**Figura 2-14.** Afloramento da Formação La Ermita.

Foto: autora (2008)



predomínio de capas delgadas, foliação fina (Figura 2-15) e uma forte deformação tectônica (dobramento, desenvolvimento de *boudinage*, forte fraturamento e cisalhamento). Próximo ao contato com a Formação Ingapata os estratos são espessos e maciços com alto conteúdo de sílica. Ao afastar-se deste contato se notam seções com predomínio de capas delgadas, laminação fina, forte deformação e diminuição do conteúdo em sílica.



**Figura 2-15.** Espessuras dos horizontes da Formação La Ermita.

Fotos: autora (2008)

### **Formação Ingapata:**

É constituída por intercalações heterogêneas de pacotes de xistos cloríticos, quartzitos cinzas, metavulcânicas, xistos quartzíticos e folhelhos (Figura 2-16). Aparece subjacente à Formação La Ermita. Localiza-se entre a margem direita da Quebrada Ingapata e a confluência do rio Mazar com o Paute.



**Figura 2-16.** Afloramento da Formação Ingapata.

Fotos: autora (2008)

**Formação La Letra:**

É constituída por intercalações de pacotes de filitos sericíticos finamente laminados (Figura 2-17) e, em algumas localidades, profundamente dobrados e deformados; além de filitos cloríticos, xistos verdes de fina foliação, e em menor proporção xistos graníticos e quartzitos de cores cinza claro a escuro. Encontra-se sob a Unidade Ingapata. Seus afloramentos se observam desde a confluência do rio Mazar com o Paute, até a jusante, na margem esquerda deste rio, ao longo dos cortes da via de chegada ao local.



**Figura 2-17.** Aspecto da Formação La Letra: (a) afloramento e (b) detalhe.

*Fotos: autora (2008)*

**Formação San Pablo:**

É constituída por xistos de cor cinza, com algumas intercalações de quartzitos e uma proporção variável de filitos cloríticos, filitos sericíticos e folhelhos. Aflora nas proximidades do reservatório de Amaluza, desde a desembocadura do rio Llavircay até a jusante (Figura 2-18).



**Figura 2-18.** Aspecto da Formação San Pablo no rio Llavircay: (a) afloramento e (b) detalhe.

*Fotos: autora (2008)*



#### 2.4.1.2 Unidade El Pan (JE)

A unidade El Pan é formada essencialmente por intercalações de xistos verdes, grafíticos e filitos quartzo-sericíticos; e em menor quantidade por pacotes de quartzitos, xistos-cloríticos e actinolíticos, mármore negros, rochas silicáticas ricas em epidoto e rochas com tremolita-clinosoizítica. Os protólitos correspondem a rochas piroclásticas silicáticas, argilas e mármore.

Estas rochas experimentaram um forte dobramento e deram lugar a uma estrutura regional sinclínio de direção N-NE que controla em parte o curso do rio Paute, como definido por Bristow e Hoffstetter (1977).

Esta unidade, de idade que remonta do Jurássico Médio ao Cretáceo Inferior, conforme Riding, 1989 *apud* Guadalupe, 2011, poderia representar uma sequência marinha de ante-arco do arco de ilhas oceânico da subdivisão Alao-Paute. Ela está parcialmente coberta por material vulcânico de idade Terciária (Vulcânicos Pisayambo), assim como por depósitos Quaternários e Recentes (terraço morfológico Guaraynag, solos residuais, terraços aluvionais antigos, aluviões recentes, depósitos coluvionares e depósitos glaciais).

Na área de estudo, as rochas da unidade El Pan ocorrem ao longo da região do reservatório da hidroelétrica Mazar.

#### 2.4.1.3 Stock vulcânico Pisayambo (MPL)

Afloramentos de rochas vulcânicas porfíricas e dacíticas de idade Terciária são reconhecidas no interior dos vales dos rios Mazar e Llavircay. Em outras zonas periféricas do local estudado há diferenciados produtos remanescentes de fluxos piroclásticos, lahares e avalanches, que se encontram agrupados dentro deste conjunto vulcânico.

#### 2.4.1.4 Terraço morfológico Huarainac (QH)

São conhecidos por esse nome os depósitos não consolidados que cobrem a sequência estratigráfica da subdivisão El Pan e ocupam as áreas planas, localizadas no



flanco esquerdo do rio Paute, entre Tuncay e o rio Pindilig.

Os sedimentos resultaram de desmoronamentos que se depositaram sobre rochas e material residual tanto da subdivisão Alao-Paute como do complexo máfico e ultramáfico Tampanchi.

#### 2.4.1.5 Solos e depósitos recentes (QS)

Conforme descrito no relatório elaborado por INECCEL (1982), estes solos correspondem a rejeitos de um antigo terraço composto por desmoronamento de bordas, blocos e cascalhos, distribuídos em uma matriz de areia argilosa. Aparecem em diferentes níveis acima do atual rio Paute, variando desde 10m até 50m, e esporadicamente até 100m.

No vale do rio Paute não se observam depósitos aluvionares recentes de extensão significativa devido ao canal encaixado e à erosão intensa. Os que existem contêm blocos e cascalhos distribuídos em uma matriz areno-argilosa. Na área de estudo, sua espessura se estima na ordem de 25m.

Parte dos depósitos de superfície corresponde a materiais coluvionares com espessuras que variam desde 5m até 42m, reapresentados por fragmentos angulosos de composição petrográfica variável, diferente grau de meteorização e distribuídos em uma matriz argilosa de cor café amarelado.

Depósitos de origem glacial (tilito) ocupam as partes altas das montanhas, na margem esquerda do rio Paute.

Escombros, detritos e evidências de deslizamento se observam indistintamente em toda a área de estudo e afetam as rochas das unidades Alao-Paute e El Pan.

## 2.5 TECTÔNICA LOCAL

### 2.5.1 EVOLUÇÃO TECTÔNICA

Em estudos já consagrados pela literatura científica, são reconhecidas três fases de deformação tectônica na região por conta de sistemas de esforços compressivos.

Segundo Bristow *op. cit.*, as rochas da subdivisão Alao-Paute sofreram o principal diastrofismo durante a fase laramídica, gerando uma compressão intensa com direção geral E-W. As dobras correspondentes a esta fase tectônica são muito comprimidas, isoclinais, acompanhadas por uma foliação intensamente desenvolvida e “*boudinage*” de filões de rocha competente. Ao que parece, os centros das dobras maiores foram substituídos por falhas de empurrão, resultando desta maneira em uma estrutura de escamas tectônicas.

O dobramento secundário causou outra foliação, a qual localmente adquiriu a mesma intensidade da foliação principal. Os eixos do dobramento secundário se dirigem preferencialmente na direção NE-SW.

Um terceiro dobramento pode ser estabelecido pela presença de rugosidades nos planos de foliação, e localmente este terceiro dobramento também ocasionou uma foliação intensa e constitui a provável causa da variação dos eixos do segundo dobramento.

Não foram identificados no local evidências de uma tectônica de idade geológica recente.

## 2.5.2 ESTRUTURA TECTÔNICA

A superposição das três fases consecutivas de dobramento resultou em uma estrutura tectônica complexa. Deformações, cisalhamentos e recristalização repetidos, convertem em inúteis ou pelo menos ambíguos os critérios sedimentares e tectônicos normalmente usados para determinar a orientação original da estratificação nas formações metamórficas. Estas condições impossibilitam o esclarecimento detalhado da estrutura geométrica. Em escala regional, no entanto, é possível definir uma estrutura geológica bastante clara. Segundo o mergulho regional, as duas bandas da subdivisão Alao–Paute se combinam para formar uma sinforme com a subdivisão El Pan no centro que se deve considerar como uma sinclinal propriamente dita, se consideradas as idades radiométricas fornecidas por Bristow *op. cit.*. No centro da zona de estudos, o eixo desta sinclinal se orienta em direção N-NE.

## 2.6 GEOMORFOLOGIA

O aspecto geomorfológico predominante na área de estudo é o relevo de alta colina (INECEL, 1984) formado pelas escarpas bem definidas controladas pela Cordilheira dos Andes, com altitudes variando desde 2.000m até 3.500m.

Esta feição corresponde aos relevos de pendentes fortes, que compreendem colinas e vales geralmente alargados e orientados em sentido NNE-SSO. As inclinações se fazem progressivamente mais fortes para leste. Os vales fluviais são estreitos e os cumes das colinas terminam geralmente em arestas formadas por rochas resistentes à erosão. A parte baixa é constituída por importantes acúmulos de material detrítico solto, formando os pés dos taludes.

Em toda a área se observam processos erosivos importantes que são coadjuvantes dos elevados índices de deslizamentos da região, e que influem na instabilização dos taludes, tanto naturais como antrópicos.

A Figura 2-19 a seguir representa a conformação geomorfológica predominante da região de estudo.



**Figura 2-19.** Relevo de alta colina predominante na região.

*Foto: autora (2008)*

Para a conformação desta forma do vale do rio Paute intervieram diferentes agentes de ordem tectônica, assim como processos geodinâmicos denudativos e

acumulativos, concluídos em relatório elaborado por INECEL (1984) da seguinte maneira:

- “O desenvolvimento morfológico atual e a posição de terraços aluvionais comprovam a existência de um levantamento epirogenético da região, possivelmente com certa inclinação, mas aparentemente homogênea;
- A orogenia andina que atuou no passado no desenvolvimento morfológico do vale do rio Paute, continua sua ação no presente. A diferença entre o vale antigo mais amplo, e o jovem mais estreito e com vertentes abruptas, é a evidência das mudanças orogênicas;
- A erosão fluvial, abaixo da cota 2.200m, está predominantemente relacionada aos processos acumulativos nas encostas médias do vale do rio Paute;
- A meteorização química é mais representativa nas vertentes médias do vale antigo;
- Regionalmente, a erosão gravitacional que atuou intensamente na denudação do vale antigo (sobre elevação 2.200m), continua definindo as formas do relevo atual;
- Os processos de acumulação de material de transporte fluvial se dão principalmente nas zonas de inundação do rio Paute. Fenômenos similares se observam na confluência de drenagens secundárias e historicamente em vários níveis de rejeitos de terraços;
- As características litológicas, estruturais e o comportamento geomecânico das formações rochosas do embasamento têm sido os condicionantes intrínsecos principais na definição das formas de relevo, na orientação (principalmente N-NE) do vale do rio Paute e no desenvolvimento dos processos erosivos gravitacionais.”

Para fundamentar estas afirmações se apresentam os seguintes exemplos, também extraídos na íntegra de INECEL *op. cit.*:

- “As rochas das subdivisões Alao-Paute e El Pan apresentam uma assimetria pronunciada nos dois flancos do vale;

- Nas rochas da subdivisão El Pan os deslizamentos se concentram em ambos os flancos do vale do Paute;
- Na Unidade La Letra, os movimentos superficiais predominantes se localizam no flanco esquerdo, favorecidos pela inclinação dos planos de foliação, e no flanco direito estão associados à descompressão;
- Os principais sistemas de estruturas controlam o sistema de drenagem principal e secundário. A tendência geral do vale segue uma orientação concordante com o sistema N-NE e as mudanças de curso na zona de Mazar se relacionam a vários sistemas de falhamento e foliação;
- Fatores externos, como pluviosidade, eventuais sismos e a atividade humana também têm incidido na formação do relevo atual;
- O intenso desmatamento presente na região e o uso inadequado do terreno têm facilitado a erosão e a aceleração de movimentos em terrenos potencialmente instáveis. Tal é o caso do histórico deslizamento La Josefina onde a exploração indevida de material, associada a outros fatores antrópicos, foi uma das causas da catástrofe.”

## **2.7 HIDROGEOLOGIA**

As características hidrogeológicas gerais estão estritamente relacionadas com as estruturas das unidades geológicas que conformam a região.

O embasamento metamórfico, com suas estruturas estratificadas e alternância de rochas permeáveis, como os quartzitos e metavulcânicas fraturadas, e rochas menos permeáveis a impermeáveis, como os xistos e filitos, armazenam a água subterrânea de maneira heterogênea nos flancos dos vales. Assim, a existência de horizontes confinados na rocha é freqüente e constitui um dos fatores principais que leva a instabilidade dos taludes por variações e incrementos às vezes instantâneos da carga hidráulica, relacionados às chuvas.

As coberturas coluvionares importantes situadas à meia encosta e nas partes

superiores dos vales, em princípio constituem aquíferos locais. Estes também podem ser cobertos por capas de colúvio argiloso, que com o aumento da carga hidráulica derivado das chuvas, provoca a ruptura e origina o deslizamento de massas que podem alcançar volumes importantes.

A observação dos níveis de vertentes e zonas pantanosas nas encostas indica, de maneira geral, a existência de um nível freático bastante elevado com um forte gradiente hidráulico até o fundo do vale.

As características hidrogeológicas da zona são muito complexas, de tal maneira que a água subterrânea se converte no agente principal dos processos que conduzem à instabilidade das encostas observadas na bacia do rio Paute.

## 2.8 CLIMA E PLUVIOMETRIA

O clima da região é influenciado por três correntes de ar principais, que são:

**Corrente amazônica:** É a que entra na bacia do rio Paute desde o Brasil, em sentido leste-oeste, e está relacionada a períodos mais chuvosos, entre os meses de março e outubro.

**Corrente do Oceano Pacífico:** Esta corrente vem desde a costa no sentido oeste-leste, em dois períodos especiais: o primeiro de fevereiro a março, e o outro menos intenso entre Outubro e Novembro. Os fenômenos El Niño e La Niña exercem um impacto fundamental sobre esta corrente.

**Anticiclone do sul:** Esta corrente chega em sentido Sul-Norte e é a que impede as precipitações na parte sul da bacia. Desta influência resulta, em Mazar, um clima equatorial mesotérmico semi úmido e úmido (Quadro 2-2), com precipitação média anual da ordem de 1.800mm/ano, e temperaturas variando desde 8°C até 23°C (Barrero, 1989 *apud* CELEC, 2011).

Apesar das elevadas altitudes, a região não apresenta picos nevados ou glaciares



em função de sua proximidade com a linha do Equador. Estudos realizados pelo IERSE - *Instituto de Estudios de Régimen Seccional del Ecuador*, definiram duas estações bem marcadas, distinguidas em seca e úmida, esta última compreende de maio a júlio.

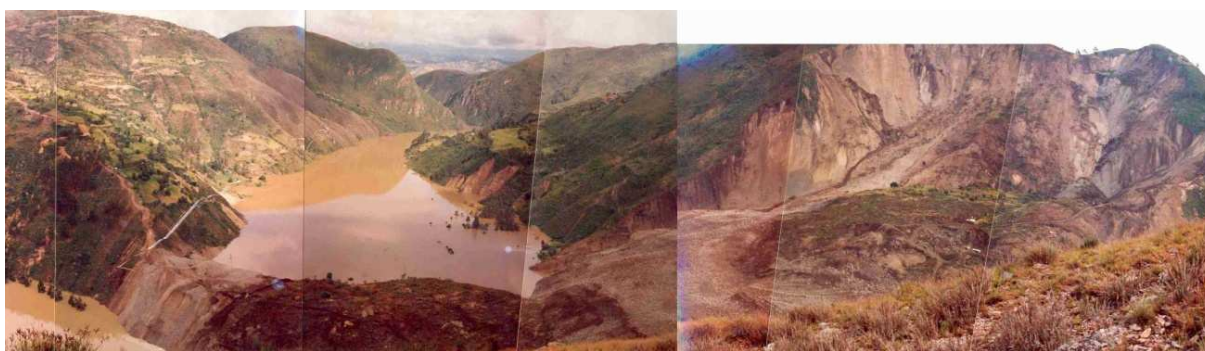
**Quadro 2-2.** Clima característico da região de Mazar (Barrero, 1989 *apud* CELEC, 2011).

Tipo	Altitudes (m)	Temperatura média anual (°C)	Umidade (%)	Precipitação (mm/ano)	Insolação (horas/ano)
Equatorial mesotérmico semi úmido e úmido	2.000-3.000	12-20 Mínima < 0°C Máxima 30°C	65-85	500-2.000	1.000-2.000

## 2.9 CASOS DE ESCORREGAMENTOS DA REGIÃO

A 54km da área de estudo ocorreu um dos maiores escorregamento da América do Sul do qual se tem registro, conhecido como “*La Josefina*”. Na madrugada do dia 29 de março de 1993 parte da montanha Nuzhuqui moveu-se e formou um dique natural de 95m de altura e 1km de extensão, justamente no ponto em que dos rios Cuenca e Jadán confluíam para formar o rio Paute (Figura 2-20).

A corrida de lama e rocha, cujo volume foi avaliado em cerca de 25 milhões de m<sup>3</sup>, apagou do mapa o povoado La Josefina onde habitavam mais de 60 famílias, destruiu estradas, fazendas e uma termoelétrica estimada em 25 milhões de dólares.



**Figura 2-20.** Escorregamento “*La Josefina*” deflagrado em 29 de março de 1993, desestabilizando uma massa de solo e rocha equivalente a 25 milhões de m<sup>3</sup>.

Foto: acervo CGM

Os rios, então represados pelo volume de material deslizado, formaram um lago de 800m de comprimento, 300m de largura e 80m de profundidade.

Em 1º de maio do mesmo ano, 33 dias após o evento, finalmente o dique rompeu,

gerando uma cheia inédita na história equatoriana com uma vazão máxima estimada em  $9.500\text{m}^3/\text{s}$  (Zevallos, 1996) que transitou até o reservatório Amaluza e provocou mais de uma centena de deslizamentos ao longo do vale (Basabe *et al.*, 1996) (Figura 2-21). O volume de material mobilizado pela cheia estima-se em 380 milhões de  $\text{m}^3$ .



**Figura 2-21.** Rompimento do dique, mobilizando 380 milhões de  $\text{m}^3$  de material.

*Foto: acervo CGM*

Além deste caso histórico de grande magnitude, a mídia tem notificado novos casos de escorregamentos de encostas e quedas de blocos quase que rotineiramente na região de Azuay, em função das chuvas.

As manchetes expostas na Figura 2-22, extraídas do jornal equatoriano *El Mercurio*, revelam isso. Além desta fonte, noticiários de mesma natureza são enfatizados no país pela rádio SUPERFM 9.49 e no jornal *El Tiempo*.



**Deslizamiento en Sísig afectó vivienda**

Las fuertes lluvias de los últimos días provocaron que se desprenda una importante cantidad de material rocoso de la parte alta de la comunidad Portul, del cantón Sísig ubicado a unos 10 minutos del centro cantonal. Una de las filosas piedras atravesó la pared de la vivienda de Carmen Morocho mientras que otros fragmentos del [...] junio 4, 2011 | [Azuay,Portada](#) | »



**Varias casas en riesgo por deslizamientos en Sinincay**

Las últimas lluvias han empeorado la situación y la población clama por atención. junio 3, 2011 | [Azuay,Portada,Región](#) | »



**Familia evacuada por deslave en Caguazhún**

El mal uso del agua sigue causando problemas, principalmente en el sector rural de la provincia del Azuay. Esta vez, en Gualaceo, se están generando desplazamientos de suelo en el sector de Caguazhún, consecuencia de esta situación, ayer se tuvo que evacuar a la familia Lucero, integrada por cuatro adultos y seis menores de edad. [...] agosto 18, 2010 | [Azuay,Portada,Región](#) | »



**MIDUVI y Municipio dotarán de casas a 11 familias damnificadas**

La emergencia se mantiene en Santa Isabel y continúa vigente la alerta naranja, pero no se ha dado paso por parte del Comité de Operaciones Emergentes COE, al pedido de declaratoria de la alerta roja, hecho por el alcalde Rodrigo Quezada, a consecuencia del macro deslizamiento ocurrido el 29 de junio en el sector Puenteloma. [...] julio 15, 2010 | [Azuay,Portada,Región](#) | »



**Vías alternas estarán listas en dos semanas en zona de derrumbe**

Las grandes fisuras ganan terreno y los hundimientos se profundizan en la vía, ayer al menos en dos tramos del trayecto destruido en la vía Cuenca – Girón – Pasaje, en el sector Pampaloma del cantón Santa Isabel, a causa de una falla Geológica activada desde el pasado lunes, era evidente la formación de desniveles de [...] junio 1, 2010 | [Azuay,Portada,Región](#) | »



**Parroquias sin respuesta concreta sobre deslizamientos**

En parroquias como Nulti donde los deslizamientos de tierra son constantes la ayuda no se hace presente, ayer el COE provincial definió comisiones de apoyo. La respuesta de las autoridades locales agrupadas en el Comité de Operaciones de Emergencia (COE) no llega en su totalidad a las parroquias rurales de Cuenca, que padecen el problema [...] enero 14, 2010 | [Cuenca,Destacadas](#) | »

**Figura 2-22.** Manchetes de deslizamientos de encostas em Azuay – Ecuador, entre 2010 e 2011.

*Fonte: El Mercurio (2011)*

## 2.10 CONTEXTO SÓCIO-ECONÔMICO DA REGIÃO

A cidade de Cuenca, com seus quase 400.000 habitantes, é a terceira maior cidade do Equador e corresponde ao centro urbano mais bem equipado da região, distando 2h de carro da área de estudo (Figura 2-23a). Foi decretada Patrimônio da Humanidade em 1999 pela UNESCO e conta com infraestrutura característica de uma cidade grande, como aeroporto, shopping, universidades, bancos, hospital. Não muito longe da cidade, os atrativos naturais, como os despenhadeiros e lagos do *Parque Nacional El Cajas* e o vulcão no *Parque Sangay*, aliado ao comércio barato de ouro, artesanato típico e comércio de flores têm atraído muitos turistas à região.

Apesar da proximidade com Cuenca, na região de estudo se observa a carência econômica típica das populações serranas (Figura 2-23b). A área é ocupada por pequenos povoados muito dispersos cuja sobrevivência advém da agricultura, principalmente plantação de milho ao longo da meia-encosta andina, e da criação de *cuy* (espécie de ratazana), comida típica, como o *chancho hornado* (porco assado).



**Figura 2-23.** (a) Centro de Cuenca, com catedral ao fundo; e (b) povoado na serra.

Fotos: autora (2008)

Nesse contexto socioeconômico de contrastes encontra-se o rio Paute, de grande importância para o país em função de seu potencial hidroenergético explorado desde 1999 pela HIDROPAUTE - *Compañía de Generación Hidroeléctrica Paute Hidropaute S.A.* Esta detém a concessão da região da *Cola de San Pablo* e elaborou o *Proyecto Paute Integral* conformado por 4 hidroelétricas em cascata: Molino e Mazar (ambas em operação - Figura 2-24), Sopladora (em execução) e Cardenillo. Quando finalizadas, em conjunto gerarão a maior parte da energia do Equador.



**Figura 2-24.** (a) UHE Mazar; e (b) UHE Molino.

Fotos: (a) CGM (2010); (b) CELEC (2011)

# ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES NATURAIS EM MACIÇOS

Os taludes ou encostas naturais de maciços rochosos, terrosos ou mistos (solo e rocha), são superfícies inclinadas originadas por processos geológicos e geomorfológicos diversos (ABGE, 1998), sujeitas a instabilizar-se. Quando isto ocorre, deflagram escorregamentos que, dependendo da profundidade do plano de ruptura, mobilizam grandes volumes de material com conseqüentes prejuízos de ordem tanto material como de vidas humanas. Com o avanço das grandes obras civis modernas, deu-se particular importância ao estudo e controle dos escorregamentos, na mesma medida em que se consolidaram os conceitos de Geologia de Engenharia.

As encostas da região de Mazar derivam do soerguimento de rochas metamórficas da Cordilheira dos Andes cobertas por um capeamento de solo residual pelito-argiloso não superior a 2m, conforme observado em trados. Os deslizamentos do tipo superficial ocorrem basicamente na margem esquerda do rio Paute, decorrentes da abertura de estradas. Os escorregamentos mais profundos e significativos ocorrem ao longo de planos de descontinuidade presentes nos maciços rochosos, muito abaixo do contato solo x rocha, e estão concentrados principalmente na margem direita do mesmo rio onde os ângulos de mergulho das foliações são concordantes com a declividade das encostas. Por esse motivo a ênfase deste trabalho é dada na análise das rupturas deste contexto.

Neste capítulo são elucidados alguns conceitos relacionados aos eventos naturais de movimentos de massa e o método adotado para analisá-los na área de estudo.



### 3.1 CLASSIFICAÇÃO DE MOVIMENTOS EM MACIÇOS

Movimentos de massa são transportes de volumes de solo, rochas e detritos (ou o conjunto desses), por ação gravitacional vertente abaixo, conforme Christofolletti, 1974.

Para a classificação de um movimento de massa são levados em consideração alguns critérios, como: velocidade, direção e recorrência dos deslocamentos; natureza do material instabilizado; textura, estrutura e conteúdo d'água dos depósitos; geometria das massas movimentadas e a modalidade de deformação do movimento, como no sistema de classificação proposto por Varnes (1978) e adotado pelo IAEG (Quadro 3-1).

**Quadro 3-1.** Classificação simplificada dos movimentos de massa segundo Varnes (1978).

Tipo de movimento		Tipo de material		
		Rocha	Solos (para engenharia civil)	
			Grossos	Finos
E S C O R R E G A M E N T O	QUEDAS	De rocha	De detritos	De solo
	TOMBAMENTOS			
	ROTACIONAL OU CIRCULAR	Abatimento de rocha	Abatimento de detritos	Abatimento de solo
	TRANSLACIONAL OU PLANAR	De blocos rochosos	De blocos de detrito	De blocos de solo
		De rocha	De detritos	De solo
	EXPANSÕES LATERAIS	De rocha	De detritos	De solo
	ESCOAMENTOS/CORRIDAS			
	RASTEJOS	Profundo	Raso	
	COMPLEXOS: Combinação de 2 ou mais dos principais tipos de movimentos.			

*Fonte: Varnes (1978) apud Borchardt (2005)*

A importância das classificações, sob o ponto de vista da aplicação, corresponde à possibilidade de se associar cada tipo de movimento de encosta a um conjunto de características. Estas podem ser: profundidade, raio de alcance, material instabilizado e potencial destrutivo que, juntamente com o entendimento das condicionantes do movimento, permitem formular modelos fundamentais para orientar a proposição de medidas preventivas e corretivas (ABGE, 1998).

Dos movimentos classificados por Varnes (1978), o que ocorre na área de estudo em maciços rochosos são preferencialmente escorregamentos do tipo translacional ou planar, embora haja outros menos expressivos, como quedas de bloco.

Nos colúvios da região estudada, a reativação dos movimentos ocorre em movimentos planares, circulares e rastejos.



### 3.1.1 TIPOS DE MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA

#### 3.1.1.1 Rastejo

São movimentos lentos que envolvem grandes massas de materiais, cujo deslocamento resultante ao longo do tempo é mínimo (mm/ano a cm/ano). Atua sobre os horizontes superficiais do solo, bem como nos horizontes de transição solo/rocha e até mesmo em rocha, em profundidades maiores. É uma deformação de caráter plástico, com



**Figura 3-1.** Indícios de rastejo na área: gretas de tração, árvores inclinadas.

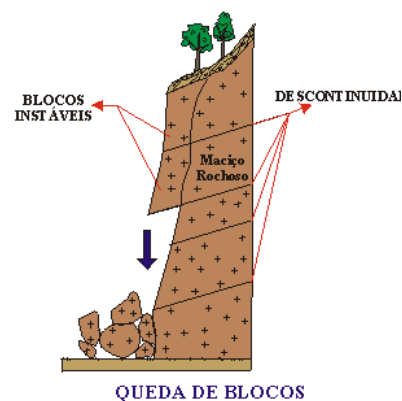
*Foto: autora (2008)*

geometria pouco definida e que não apresenta uma superfície de ruptura nítida. Caso um rastejo não estabilize, ele pode desencadear um escorregamento.

Na área de estudo os rastejos ocorrem preferencialmente em horizontes mais superficiais dos depósitos coluvionares, não excedendo 2m de profundidade, e se reativam em períodos chuvosos (inverno equatorial) em função do aumento da umidade natural, ou por descalço do pé dos taludes. São evidenciados por gretas de tração rasas e árvores inclinadas (Figura 3-1).

#### 3.1.1.2 Queda de bloco

São movimentos extremamente rápidos (da ordem de m/s) e envolvem blocos e/ou lascas de rocha em movimento de queda livre (Figura 3-2). Na área de estudo não foram observados movimentos desta natureza em rocha, mas de maneira pouco expressiva, ao longo das estradas.



**Figura 3-2.** Queda de blocos.

### 3.1.1.3 Escorregamento

Segundo Augusto Filho (1994), os escorregamentos consistem em movimentos rápidos de massa de solo ou rocha geralmente bem definidas quanto à sua forma, e cujo centro da gravidade se desloca para baixo e para fora de um talude natural ou artificial. As principais características deste tipo de movimento são: existência de poucos planos de deslocamento; velocidades médias (m/h) a altas (m/s); pequenos a grandes volumes de material deslocado. Dependendo da geometria do material instabilizado, o autor difere os escorregamentos em planar ou translacional; rotacional ou circular; e em cunha.

Ahrendt (2005) define os escorregamentos como uma consequência da deformação cisalhante que pode ocorrer ao longo de uma ou mais superfícies, podendo abranger materiais rochosos ou solo. Para a autora, as superfícies de deslizamento podem ser visíveis ou razoavelmente inferidas, e os movimentos progressivos, ou seja, o cisalhamento pode se propagar a partir de uma ruptura localizada de pequena extensão.

Além disso, nos escorregamentos em maciço composto preferencialmente por rocha, a resistência de cisalhamento de pico é bastante elevada, enquanto a residual diminui consideravelmente a ponto de se aproximar dos valores correspondentes aos solos. Essa queda abrupta na resistência após o movimento deflagrado resulta na formação de indícios de instabilização, como trincas, fendas de tração e abatimentos de solo que indicam possibilidade de uma ruptura iminente.

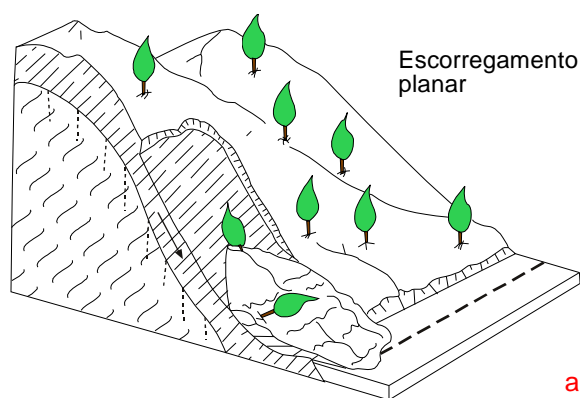
#### **Escorregamento Planar ou Translacional:**

Nestes escorregamentos, a massa de solo/rocha apresenta grande deformação e é rompida por cisalhamento. Progride indefinidamente sobre uma superfície plana enquanto a inclinação desta permitir ou ainda enquanto a resistência ao cisalhamento permanecer menor do que as forças atuantes (Figura 3-3a). Em rocha, geralmente este tipo de escorregamento é controlado por descontinuidades, ou seja, superfícies de fraqueza que são geradas por falhas, juntas, foliação, planos de acamamento com variação de resistência ao cisalhamento entre as camadas, ou ainda no contato solo/rocha (Augusto Filho *op. cit.*).

Em Mazar, este tipo de escorregamento é o mais expressivo. Ocorre tanto em

solos residuais, onde o movimento foi deflagrado principalmente pela abertura de estradas (Figura 3-3b); como em rocha descomprimida e alterada, ao longo de planos de fraqueza de em grandes profundidades, como mostra a Figura 3-3c. O Capítulo 4 discorre sobre os casos mais preocupantes de escorregamento planar da área de estudo.

As razões de deflagração dos movimentos planares profundos da região, segundo registro histórico, têm a ver com tremores provocados por ativação de falhas ou ainda pela forte vibração decorrente da passagem da cheia La Josefina que, além de provocar uma ação sísmica, promoveu o descalçamento do pé de alguns taludes.



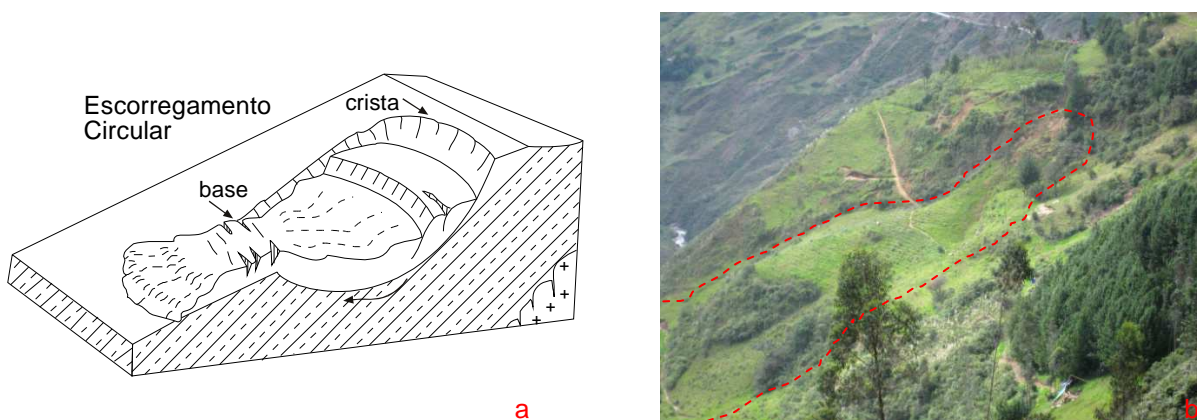
**Figura 3-3.** (a) Modelo de escorregamento planar; (b) feições rasas em solo e (c) cicatriz antiga.

Fotos: (a) Borchardt (2005); (b,c) autora (2008)

### **Escorregamento Circular ou Rotacional:**

Estes escorregamentos ocorrem preferencialmente ao longo de superfícies internas de deslizamentos já ocorridos, envolvem apenas uma ou poucas unidades lito/pedológicas e geram uma superfície curva com concavidade voltada para cima. A massa deslocada tende a restaurar seu equilíbrio após algum tempo de movimentação. O material

escorregado apresenta fendas superficiais após a movimentação, como mostra a Figura 3-4a. A porção superior da cicatriz de escorregamento e as laterais apresentam inclinação mais acentuada e tornam-se locais suscetíveis a novos deslizamentos. Apesar deste tipo de escorregamento ocorrer preferencialmente em materiais mais homogêneos, como barragens de terra e aterros, na área de estudo o mesmo é observado em colúvios espessos, como mostra Figura 3-4b, com gretas de tração de até 3m de profundidade.



**Figura 3-4.** (a) Modelo de escorregamento circular e (b) feição na área de estudo.

*Fonte: (a) Borchardt (2005); (b) autora (2008)*

### **Escorregamento em cunha:**

Uma cunha é formada pela intersecção de pelo menos dois sistemas de descontinuidades translacionais que afloram em superfície. A simples existência dessa



**Figura 3-5.** Feição de cunha na área.

*Foto: autora (2008)*

estrutura não é suficiente para que haja movimento. As condicionantes de mobilização da cunha são: a linha de intersecção, que representa a direção do movimento, deve aflorar na superfície livre do talude; e sua inclinação deverá ser maior que o ângulo de atrito interno dos planos.

A Figura 3-5 apresenta uma feição em cunha com potencial de instabilizar-se.

### 3.2 FATORES CONDICIONANTES DE ESCORREGAMENTO

Um escorregamento ocorre quando as forças mobilizantes se igualam às de resistência, o que pode ocorrer com o aumento de tensões cisalhantes ou pela redução da resistência. Este mecanismo é controlado por uma cadeia de eventos que tem sua origem com a formação da própria rocha e toda sua história geológica e geomorfológica subsequente, como movimentos tectônicos, erosão, ação antrópica (ABGE, 1998).

Apesar da complexidade dos processos que regem um movimento de massa, é possível estabelecer um conjunto de condicionantes que atuam de forma mais direta e imediata na deflagração, os chamados agentes predisponentes e efetivos, segundo Guidicini e Nieble (1976). Os primeiros referem-se às características naturais intrínsecas dos terrenos. Os segundos, chamados efetivos, são responsáveis diretos pelo desencadeamento das instabilizações dos taludes e podem ser divididos em preparatórios ou imediatos dependendo de sua forma de atuação no período que antecede à ruptura. Os preparatórios incluem pluviosidade, erosão, congelamento, degelo, variação térmica, dissolução química, ação de fontes de mananciais, oscilação freática, ação antrópica e de animais; enquanto os imediatos abrangem os mesmos fenômenos, porém em maior intensidade, e incluem terremotos.

Varnes (1978) cita alguns fenômenos naturais e ações antrópicas como sendo os fatores responsáveis por aumentar a sollicitação em um talude e diminuir a resistência do terreno, como pode ser observado no Quadro 3-2.

**Quadro 3-2.** Fatores deflagradores dos movimentos de encosta (VARNES, 1978).

Fenômenos naturais e antrópicos		Fatores	Ação
Erosão, escorregamentos		Remoção de massa (lateral ou da base)	Aumento da solicitação
Cortes			
Peso da água de chuva, neve, granizo		Sobrecarga	
Acúmulo natural de material			
Peso da vegetação			
Construção de estruturas, aterros		Solicitações dinâmicas	
Terremotos, ondas, vulcões			
Explosões, tráfego, sismos induzidos		Pressões laterais	
Água em trincas, congelamento, material expansivo			
Características geomecânicas do material		Características inerentes ao material	
Intemperismo, redução da coesão, ângulo de atrito		Mudanças ou fatores variáveis	Redução da resistência
Elevação do nível d'água			
Enfraquecimento devido ao rastejo progressivo			
Ação das raízes das árvores e buracos de animais		Outras causas	

Fonte: ABGE (1998)

Na região de estudo a litologia predominante é composta por rochas metamórficas foliadas das unidades do Terreno Alao, com má condição geomecânica devido ao alto grau de alteração, fraturamento e presença de planos de cisalhamento bem marcantes. Neste contexto litológico; os principais agentes deflagradores dos processos de instabilização de massas superficiais de solo e rocha são a intensidade de chuvas e a ação antrópica, potencializados por eventos sísmicos. Para os escorregamentos de caráter mais profundo condicionados pelas descontinuidades dos maciços rochosos, ou mesmo no horizonte de contato solo x rocha, os agentes efetivos incluem a ação combinada da presença de água nos planos de fraqueza com a ação sísmica.

No caso das chuvas, estas provocam a saturação dos materiais superficiais diminuindo a resistência ao corte e do ângulo de atrito, resultando na ruptura destes que se mobilizam favorecidos pela ação da gravidade nas encostas íngremes.

Com respeito à ação antrópica, o que se percebe na região é que os condicionantes deste aspecto incluem desde a extração de vegetação de alta-montanha para a implantação de cultivo de forma inapropriada, até a intervenção de obras civis, como a abertura de estradas.

A proximidade com fontes sismogenéticas, como as falhas expostas no Capítulo 2, atribui à região um potencial médio de ação sísmica que deve ser considerado para fins de análise de estabilidade.

### **3.3 MECANISMOS DE RUPTURA**

Como já mencionado, os movimentos de massa aqui analisados estão relacionados à ação antrópica, da água da chuva e aos eventos sísmicos esporádicos, porém de grande repercussão na estabilidade das encostas. Os mecanismos acionados por estes elementos são tratados a seguir.

#### **3.3.1 AÇÃO ANTRÓPICA**

A retirada da vegetação de alta-colina para a implantação da agricultura de



subsistência deixou o solo da região quase completamente exposto às ações pluviométricas, e os processos de instabilidade provocados por esta ação já se fazem notar.

A abertura de estradas na região provocou o descalçamento da cobertura de solos e deflagrou escorregamentos ao longo de quase todas as vias de acesso à área.

Considerando que os dois casos acima são a forma de uso e ocupação do terreno estabelecida na região de Mazar, a contribuição antrópica deixa de ser o principal agente promotor de novos eventos de instabilidade das encostas por já tê-las provocado em sua quase totalidade.

### 3.3.2 AÇÃO DA ÁGUA

A água presente nos planos de deslizamento reduz a resistência ao cisalhamento de um maciço, enquanto a acumulada nas fendas de tração aumenta as forças mobilizantes podendo afetar a estabilidade de uma encosta (Fiori e Carmignani, 2009). Além disso, ela auxilia no processo intempérico levando a uma progressiva perda da resistência do material. Essa ação provocada pela água pode ser tão destrutiva a ponto de provocar deslizamento ao longo de planos muito pouco inclinados, entre 2° e 3° (Taylor, 1977).

Se considerada apenas a água pluviométrica como agente de contribuição de saturação do substrato, os riscos geotécnicos aumentariam no inverno equatorial, época em que as chuvas se intensificam e o mecanismo promotor do escorregamento seria a saturação pelo topo, segundo FIORI *op. cit.*, em função da perda da sucção. Este mecanismo está relacionado ao aumento da umidade pelo avanço da frente de saturação e a ruptura ocorre sem que a condição de saturação total do meio seja alcançada.

Para muitos autores não é apenas o fluxo vertical descendente provocado pela infiltração da água da chuva que promove os mecanismos de ruptura, mas também aqueles que ocorrem em outras direções, como os que ascendem pelas fraturas dos maciços rochosos, devido ao armazenamento de água subterrânea.

No caso de Mazar, onde o nível de água do rio Paute será elevado quase 100m acima do seu nível normal para compor o reservatório da hidroelétrica em seu nível máximo

de operação, a maior contribuição da saturação dos taludes circunvizinhos se dará pela ação da água do próprio reservatório. Neste mecanismo de saturação, a ação da água provoca o aumento da pressão neutra ou de poro-pressão ( $\mu$ ), a qual age reduzindo a componente normal do peso do material e instabiliza as encostas. Esta redução pode chegar a ponto das forças cisalhantes superarem as de resistência, provocando um escorregamento. O maciço não precisará estar necessariamente saturado em toda sua espessura para que este fenômeno ocorra.

Considerando apenas as águas pluviais e as do reservatório da barragem de hidroelétrica como agentes promotores de eventos de instabilidade, os mecanismos de ruptura e as propriedades físicas dos maciços rochosos afetados podem ser resumidos pela perda de sucção, ou coesão aparente, e pelo aumento da pressão neutra, respectivamente, como mostra o Quadro 3-3.

**Quadro 3-3.** Agentes promotores de escorregamentos e as propriedades físicas envolvidas.

Agente	Mecanismos de ruptura	Propriedades físicas
Água da chuva	Saturação pelo topo ou descendente	Perda da sucção/coesão aparente
Água do reservatório	Saturação pela base ou ascendente	Aumento da pressão neutra

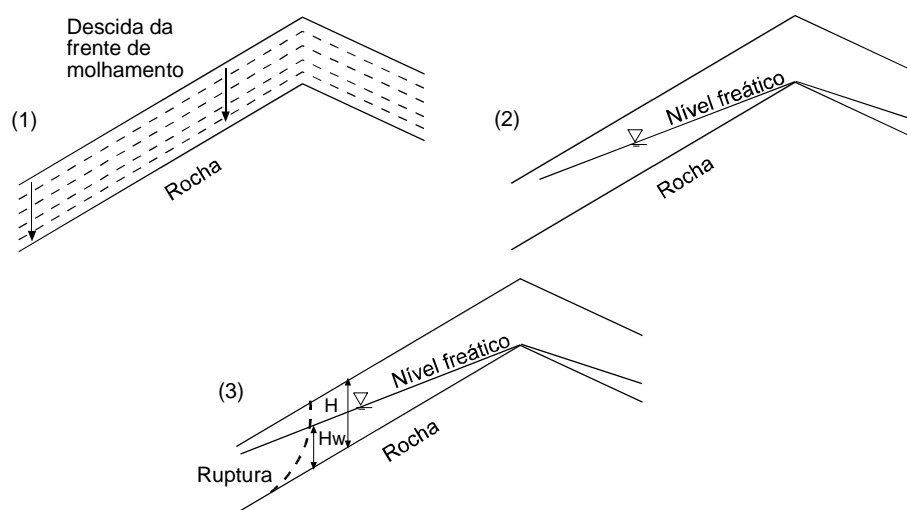
Além dos agentes mencionados acima, deve-se recordar que outra forma da água atuar na região como agente deflagrador de movimento ocorreu com a passagem da cheia La Josefina. A ação imediata de instabilização deste fenômeno esteve relacionada mais com o descalçamento do pé dos taludes do que com a saturação em si, a qual se tornou um agente secundário dos escorregamentos, atuando em longo prazo nas vertentes.

Os mecanismos de saturação pelo topo e pela base, percorridos por Ahrendt (2005), são expostos a seguir.

### 3.3.2.1 Saturação pelo topo ou descendente

A infiltração contínua da água pela ação da chuva eleva a umidade do material de superfície até a diminuição significativa da sucção, que pode ocorrer antes mesmo da saturação total do maciço em uma profundidade qualquer, dependendo das características

de capacidade de retenção do solo. Esta perda de sucção diminui a resistência ao cisalhamento em solos não saturados e provoca o escorregamento. A superfície de ruptura se dá ao longo do horizonte em que a perda da sucção ocorre (Figura 3-6). Os escorregamentos resultantes deste tipo de mecanismo associam-se a vertentes muito íngremes onde a estabilidade depende muito da coesão do solo incrementado pelas forças de sucção, e também podem ser observados durante ou logo após uma sequência de eventos de chuvas. No caso de Mazar, este mecanismo de ruptura está mais associado aos solos coluvionares decorrentes de deslizamentos antigos, os quais podem saturar e instabilizar, movendo-se sobre o horizonte de contato com a rocha.



**Figura 3-6.** Sequência de mecanismo de ruptura por saturação pelo topo: 1, 2 e 3.

*Fonte: Ahrendt (2005), pg.17*

### 3.3.2.2 Saturação pela base ou ascendente

A sobreposição de materiais de propriedades hidrogeológicas distintas gera uma barreira que impede a migração do fluxo de água para regiões mais profundas do maciço. Em se tratando de solo, isto pode ocorrer no contato entre tipos com permeabilidades diferentes, ou mesmo no contato solo/rocha, quando próximo à superfície. Após algum tempo de chuva, esta barreira natural acaba por provocar o aumento do nível de água no solo causando um acréscimo na pressão neutra ( $\mu$ ). Esta pressão, conforme Fiori e Carmignani (2009), atua em sentido contrário à tensão normal ( $\sigma_n$ ) em um plano potencial de

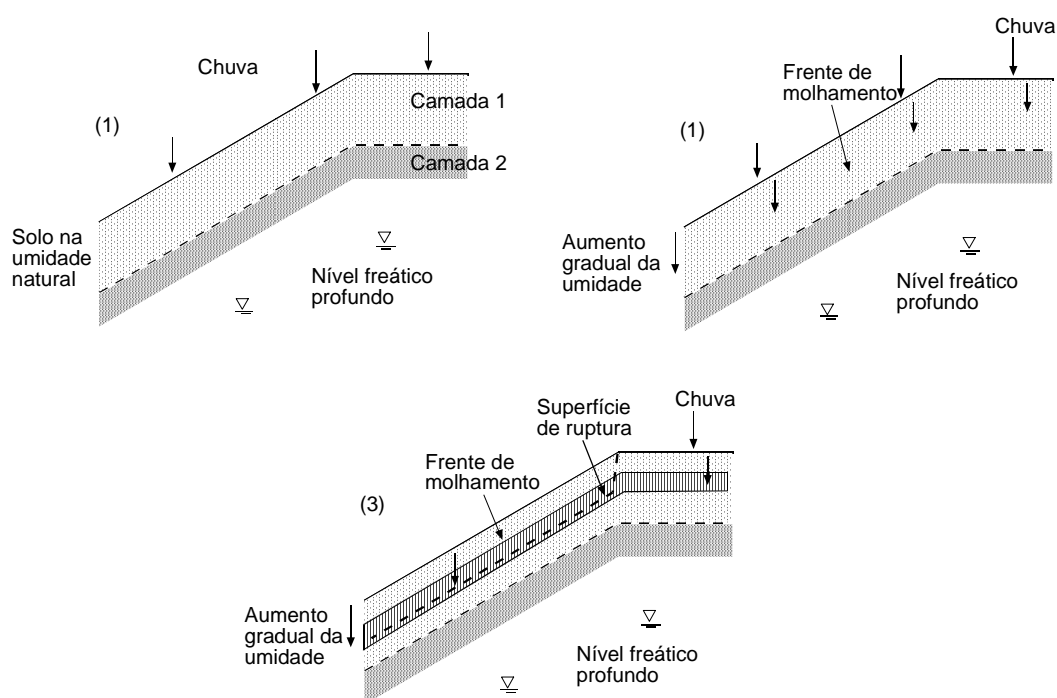
escorregamento e, assim, a resistência ao cisalhamento ( $\tau$ ) sofre uma diminuição devido à redução da pressão normal ( $\sigma_n$ ), como evidenciado na equação da Lei de Coulomb (Eq. 3-1):

$$\text{Eq. 3-1} \quad \tau = c + (\sigma_n - \mu)tg\phi$$

Pela equação acima se entende que o aumento da pressão neutra ( $\mu$ ) reduz a tensão normal ( $\sigma_n$ ). Se o nível freático elevar-se a ponto da pressão neutra igualar-se à pressão normal exercida pelo próprio peso da vertente, anula-se a expressão  $(\sigma_n - \mu)tg\phi$  da Eq. 3-1 e a resistência fica em função exclusiva da coesão ( $c$ ). No caso de haver descontinuidades no maciço, nestes locais a coesão é praticamente zero. Assim, para um talude que tenha descontinuidades e no qual ( $\sigma_n$ ) tenha sido anulada por ( $\mu$ ), a resistência ao cisalhamento é praticamente nula e o escorregamento torna-se iminente. A ruptura do maciço, neste caso, se deve à elevação da pressão neutra, o que pode ocorrer até mesmo depois da chuva ter cessado.

A seqüência sistemática deste mecanismo engloba três processos, como bem definem ENOKI *et al.* (1999), e cuja representação está na Figura 3-7:

- infiltração de água na superfície e conseqüente descida da frente de saturação;
- chegada da frente de saturação a uma superfície de descontinuidade, e posterior formação de uma superfície freática que ascende continuamente enquanto houver uma fonte de água;
- elevação da superfície freática criada até um ponto em que ocorre a perda de resistência ao cisalhamento do solo, provocando a ruptura.



**Figura 3-7.** Mecanismo de ruptura por saturação pela base.

*Fonte: Ahrendt (2005), pg.18*

No caso em estudo, além da saturação pela base ser causada por infiltração das águas pluviais, a presença do reservatório com uma lâmina d'água de 100m potencializará o efeito de poropressão, além de causar a saturação plena do material de solo e rocha descomprimida e alterada submerso.

### 3.3.3 AÇÃO SÍSMICA

Dentre os abalos sísmicos originados por fenômenos naturais, os terremotos são



o epicentro (foco) e o hipocentro.

os mais comuns. Esses tremores passageiros que ocorrem na crosta terrestre podem ser desencadeados por fatores como atividade vulcânica, falhas geológicas e, principalmente, pelo encontro de diferentes placas tectônicas.

Se causado por falha ou encontro de placas, o local onde isto ocorre é chamado de hipocentro ou foco (Figura 3-8) e o epicentro é o

correspondente vertical em superfície. As conseqüências podem ser sentidas a quilômetros de distância, dependendo da proximidade com a superfície que ocorreu a colisão e da magnitude do evento.

### 3.3.3.1 Magnitude e Intensidade

A magnitude é a quantidade de energia liberada no foco do terremoto, sendo medida comumente a partir da Escala Richter. A intensidade é o efeito destrutivo provocado por esse fenômeno, classificado por algumas escalas, como a Escala Mercalli.

#### **Escala Richter:**

A escala de Richter, desenvolvida em 1935 pelos sismólogos Charles Francis Richter e Beno Gutenberg, ambos membros do *California Institute of Technology (Caltech)*, representa a energia sísmica liberada durante um terremoto, baseada em registros sismográficos das ondas verticais produzidas pelo tremor, e por isso mesmo trata-se de uma escala quantitativa. É uma escala adimensional que originalmente varia de 1 a 9, mas não se limita a estes valores e pode superar o nível máximo já mensurado na história. As magnitudes dos eventos estão representadas no Quadro 3-4.

**Quadro 3-4.** Escala Richter (1935) – Escala de Magnitude.

Magnitude	Alcance de efeitos
<2,0	Micro tremor de terra, não se sente.
2,0-2,9	Geralmente não se sente, mas é detectado/registrado.
3,0-3,9	Frequentemente sentido, mas raramente causa danos.
4,0-4,9	Tremor notório de objetos no interior de habitações, ruídos de choque entre objetos. Danos importantes pouco comuns.
5,0-5,9	Pode causar danos maiores em edifícios mal concebidos em zonas restritas. Provoca danos ligeiros nos edifícios bem construídos.
6,0-6,9	Pode ser destruidor em zonas num raio de até 180 quilômetros em áreas habitadas.
7,0-7,9	Pode provocar danos graves em zonas mais vastas.
8,0-8,9	Pode causar danos sérios em zonas num raio de centenas de quilômetros.
9,0-9,9	Devasta zonas num raio de milhares de quilômetros.
>10,0	Nunca registrado.

Em termos de amplitude de onda, esta aumenta de forma logarítmica de maneira que cada ponto da escala significa uma multiplicação da amplitude da onda 10 vezes maior que a onda da escala anterior. Dessa forma, um sismo de magnitude 4 possui uma onda



100 vezes maior em amplitude que um de magnitude 2. Em termos de energia, esta aumenta também de forma logarítmica e o fator multiplicador é 33 para cada grau de magnitude, ou aproximadamente 1.000 vezes a cada duas unidades.

### **Escala Mercalli Modificada:**

A escala de intensidade Mercalli, criada em 1902 pelo sismólogo italiano Giuseppe Mercalli e modificada pelo mesmo autor em 1956, avalia o evento sísmico pelos danos produzidos nas estruturas e percebidos pelas pessoas nas imediações do abalo, conforme mostra o Quadro 3-5.

**Quadro 3-5.** Escala Mercalli Modificada (1956) – Escala de Intensidade.

<b>Intensidade</b>	<b>Efeitos observados</b>
I	Não sentido. Apenas registrado pelos sismógrafos.
II	Sentido por um reduzido número de pessoas em repouso, em especial pelas que habitam em andares altos.
III	Sentido por um pequeno número de pessoas. Bem sentido nos andares elevados.
IV	Sentido nas casas, podendo despertar do sono um pequeno número de pessoas. Nota-se a vibração de portas e janelas e das louças dentro dos armários.
V	Praticamente sentido por toda a população, fazendo acordar muita gente. Há queda de alguns objetos menos estáveis e param os pêndulos dos relógios. Abrem-se pequenas fendas nas paredes.
VI	Provoca início de pânico nas populações. Produzem-se leves danos nas habitações, caindo algumas chaminés. O mobiliário menos pesado é deslocado.
VII	Caem muitas chaminés. Há estragos limitados em edifícios de boa construção, mas importantes e generalizados nas construções mais frágeis. Facilmente perceptível pelos condutores de veículos em trânsito. Desencadeia pânico geral nas populações.
VIII	Danos acentuados em construções sólidas. Os edifícios de muito boa construção sofrem alguns danos. Caem campanários e chaminés de fábricas.
IX	Desmoronamento de alguns edifícios. Há danos consideráveis em construções muito sólidas.
X	Abrem-se fendas no solo. Há cortes nas canalizações, torção nas vias férreas e empolamentos e fissuras nas estradas.
XI	Destruição da quase totalidade dos edifícios, mesmo os mais sólidos. Caem pontes, diques e barragens. Destruição das redes de canalização e das vias de comunicação. Formam-se grandes fendas no terreno. Há grandes escorregamentos de terrenos.
XII	Destruição total. Modificação da topografia. Nunca foi presenciado no período histórico.

Para um mesmo sismo, a intensidade pode ser diferente em diversas localidades reportadas. A escala de Mercalli tem uma importância qualitativa e não deve ser interpretada em termos absolutos uma vez que depende de observação humana. Um sismo com magnitude 8 na Escala Richter, ocorrido num deserto inabitado, é classificado como 1 na escala de Mercalli, enquanto um sismo de magnitude 5, por exemplo, numa zona onde as construções são débeis e pouco preparadas para resistir a terremotos, pode causar efeitos devastadores e ser classificado com intensidade 9 na Escala Mercalli.

### 3.3.3.2 Aceleração horizontal

A aceleração é o incremento da velocidade por unidade de tempo, medida em g ou  $\text{cm/s}^2$ . Quando vinculada ao estudo de sismos, esta variável corresponde a um coeficiente horizontal ( $K_h$ ) que atua nos terrenos no sentido de favorecer as forças cisalhantes de uma encosta impulsionando suas partículas para fora desta, quando seu valor exceder a aceleração de escoamento presente na mesma (Newmark, 1965). Este coeficiente depende da magnitude do evento sísmico e da distância do epicentro, pois enquanto a magnitude é um valor único relacionado com a energia liberada pelo terremoto, a aceleração varia decrescendo conforme se afasta do epicentro.

A aceleração sentida pelo substrato rochoso é amplificada no solo modificando os valores dos parâmetros geotécnicos dos diversos materiais que compõem o talude, normalmente crescendo com a altura deste e atingindo o pico em sua crista (Chuquimuni, 2005). A forma como o terreno irá se comportar frente a esta aceleração dependerá das características intrínsecas do mesmo, como tipo de solo e rocha e a distribuição espacial de suas estruturas, e inclusive de sua topografia, como defendido por Bodare (1997).

Quando um movimento sísmico for registrado em acelerógrafo engastado em rocha num local próximo à uma área em estudo, os valores de aceleração registrados podem ser utilizados diretamente nas análises. No entanto, para os casos em que os acelerógrafos estiverem longe da área em questão, as acelerações medidas devem ser corrigidas por meio de funções de atenuação determinadas com base nas distâncias da fonte sísmica e características de amortecimento dos materiais geológicos regionais (Schnabel *et al.*, 1972 *apud* Chuquimuni, 2005).

Quando os acelerógrafos estiverem instalados em solo, a aceleração correspondente em rocha pode ser determinada pela teoria de propagação de ondas em processos de deconvolução das acelerações, segundo citado por Chuquimuni *op. cit.* Este mesmo autor afirma que na ausência de registros sísmicos pode-se definir um projeto com base na sismicidade local através de técnicas probabilísticas.

Com estas observações feitas, entende-se que definir o valor de  $K_h$  é o aspecto mais importante e mais difícil no emprego de métodos dinâmicos ou pseudo-estáticos de

análise da estabilidade de uma encosta. Para facilitar sua dedução, a literatura sugere alguns valores de coeficiente de aceleração resultantes da observação dos efeitos de alguns casos reais em campo em função do valor de PGA (*Peak Ground Acceleration*), como pode ser visto no Quadro 3-6.

**Quadro 3-6.** Coeficiente sísmico horizontal ( $K_h$ ) em função do PGA.

Coeficiente sísmico horizontal ( $K_h$ ) em função do PGA	Referência
0,05-0,15PGA	Califórnia, EUA
0,10-0,15PGA	Corpo de Engenheiros, 1982
0,17PGA <sub>solo</sub>	Kavazanjian <i>et al.</i> , 1997
0,15-0,25PGA	Japão
0,33-0,5PGA <sub>solo</sub>	Marcuson, 1981
0,5PGA <sub>rocha</sub>	Hynes-Griffin e Franklin, 1984
0,75PGA <sub>rocha</sub>	Bray <i>et al.</i> , 1998

A variável PGA, com a qual o coeficiente de aceleração é correlacionado, corresponde à máxima aceleração horizontal que um terremoto pode provocar no terreno de um determinado local, e é mensurada por meio de alguns métodos. Por meio do PGA se deduz o coeficiente ( $K_h$ ) e a diferença entre ambos é que o primeiro, apesar de ter maior intensidade, atua geralmente em um único instante de tempo e em um único sentido, enquanto o segundo tem efeito prolongado em todas as direções do terreno.

Dos autores citados no Quadro 3-6, Marcuson (1981) sugere um valor de coeficiente sísmico ( $K_h$ ) entre 1/3 a 1/2 da aceleração horizontal máxima (PGA) esperada em solo, incluindo, portanto, os efeitos de amplificação no mesmo, o qual estima uma resposta sísmica do talude como um todo. Este foi o critério adotado no presente estudo.

O valor de PGA adotado para o projeto de Mazar resultou da análise de risco sísmico da região elaborada por INECEL (1998) com base na aplicação de métodos probabilísticos, dada a inexistência de acelerógrafos na área. A seguir é apresentado um resumo do referido trabalho para esclarecimento do valor de PGA base.

#### **Análise de risco sísmico na área de estudo:**

A avaliação do risco sísmico de um local é um estudo completo que inclui análises estatísticas rigorosas e permite elaborar um modelo de atividade sísmica para a área de influência de um determinado empreendimento e o efeito deste sobre a obra. Um dos parâmetros derivados da análise de risco é justamente o pico de aceleração horizontal

máxima (PGA) que esta obra poderá sofrer devido à ação do pior caso de sismo passível de ocorrer durante sua vida útil.

Dentro da categoria de risco enquadram-se os eventos sísmicos com até 10% de chances de ocorrer ao longo dos 50 anos seguintes à análise. Conforme Morote (2006), isto permite a escolha de uma alternativa de projeto que represente a melhor combinação entre custo e risco.

Esse tipo de informação oferece os parâmetros necessários para projetar construções que resistam aos efeitos de sismos dando mais segurança para obras com vida útil longa, como a barragem de hidroelétrica de Mazar, cuja vida útil foi projetada para 100 anos.

O valor de PGA para Mazar foi obtido com base em análise de risco sísmico elaborado por INECEL (1998) através do emprego do método McGuire-Cornel que quantifica a probabilidade da aceleração exceder a certo valor durante um prazo de tempo determinado, conhecido como tempo de recorrência. Os resultados são expressos em termos de probabilidade de excedência. Tal método depende das seguintes relações:

- processo probabilístico de ocorrência dos terremotos considerados (geralmente assumidos com uma distribuição de Poisson);
- distribuição de magnitudes nas diferentes fontes consideradas (relação Gutenberg - Richter);
- relação de atenuação que brinda a força da vibração do terreno (freqüentemente expressa através da aceleração) em função da distância da fonte sísmica.

Destas três relações, a de atenuação é considerada a mais crítica. Infelizmente, esta difere muito de uma localidade a outra e, como não existem no presente tais relações para o Equador, a análise citada em INECEL (1998) foi realizada com base em considerações teóricas aferidas em comparação com a relação de atenuação de outra região.

Historicamente, a região próxima ao projeto Mazar mostra que as maiores

intensidades sofridas na porção média da bacia do rio Paute são da ordem de 7 graus na escala Mercalli Modificada, produzida fundamentalmente por sismos de magnitude maiores que 7 na Escala Richter, localizados na placa Nazca a profundidades em torno de 100km sob o sítio da obra.

A Zona Subandina e a Subducção Sul também contribui estatisticamente nas intensidades sísmicas da região, embora menos freqüentes que a placa de Nazca, com valores de intensidade 6 (Escala Mercalli Modificada).

As demais falhas de expressão no país, como a Subducção Norte e as falhas do limite oriental do Bloco Norandino, promovem sismos cujas intensidades sentidas em Mazar são menores que 6 (Escala Mercalli Modificada).

Pelas situações observadas, a análise probabilística citada em INECCEL (1998) determinou que para 95% de não-excedência de um sismo de magnitude 7,5 em 100 anos de vida útil da obra, a aceleração horizontal máxima correspondente seria de  $0,34\text{cm/s}^2$ . No entanto, este valor foi reavaliado pelos próprios autores em função das incertezas derivadas do próprio método, pois superestima os valores de aceleração para períodos de retorno espaçados e não considera os efeitos topográficos, conforme observado por Bodare *op. cit.* Tais efeitos diminuiriam o PGA em 35% do valor deduzido por probabilidade para os casos de topografia plana. Assim, considerando um relevo ondulado para Mazar, este percentual de redução do PGA foi abatido à metade do seu valor teórico, ou seja, a 17,5% resultando assim em uma aceleração de pico (PGA) de  $0,28\text{cm/s}^2$ .

Correlacionando o valor de PGA de  $0,28\text{cm/s}^2$  exposto acima, resultante da análise de risco físico elaborada para a região de Mazar (INECEL, 1998), ao critério de Marcuson (1981) exposto no Quadro 3-6, o coeficiente de aceleração recomendado para fins de projeto no local da barragem corresponderia à metade deste, ou seja,  $K_h=0,14\text{cm/s}^2$ , que poderia ser provocado por um evento sísmico de Magnitude 7,5 (Escala Richter) originado na zona de Benioff, a 80km de profundidade sob o local de estudo.

Além do hipocentro na região de subducção das placas, considerado como fonte do maior evento sísmico possível de afetar Mazar, há outros dois locais próximos, distantes entre 5km e 25km da área, com atividades microssísmicas resultantes possivelmente de

falha normal e transcorrente, como sugere INECEL (1982), com magnitudes mais baixas, entre 0,4 e 2,6 na Escala Richter, e portanto não avaliadas para fins de projeto.

Supõe-se que o sismo provocado pela passagem da cheia La Josefina tenha alcançado magnitudes entre 3,5 e 4 na Escala Richter e gerado um coeficiente sísmico horizontal de  $0,05\text{cm/s}^2$ , o qual foi suficiente para causar alguns dos escorregamentos expostos no Capítulo 4. Se com tão baixa magnitude os efeitos de instabilidade são notáveis nos taludes da região, que dirá o que pode deflagrar se o PGA de projeto for atingido.

Para fins de cálculos de análise pseudo-estática, o coeficiente  $K_h$  é o elemento que se une às forças cisalhantes atuantes sobre uma encosta potencializando sua instabilidade. Por isso os dois valores mencionados acima, tanto o de projeto ( $K_h=0,14\text{cm/s}^2$ ) como o provocado por sismos baixos a médios e pela passagem da cheia La Josefina ( $K_h=0,05\text{cm/s}^2$ ) são tomados em consideração nos cálculos de Fator de Segurança aplicados nesta tese e seu resumo encontra-se no Quadro 3-7.

**Quadro 3-7.** Valores de aceleração definidos para análise pseudo-estática da área de estudo.

Evento	Grau de Magnitude (Escala Richter)	Tempo de recorrência (anos)	Distância vertical do hipocentro (km)	PGA $\text{cm/s}^2$	( $K_h$ ) $\text{cm/s}^2$
Sismo baixo a médio anterior a 1983; Cheia La Josefina	3,5	50	0	0,10	0,05
Pior sismo estimado para fins de projeto	7,5	100	80	0,28	0,14

### 3.3.3.3 Sismos induzidos

Além dos fenômenos naturais, há os chamados sismos induzidos. Estes, para deflagrarem, requerem ação humana direta ou indireta, como os provocados pela retirada de água de aquíferos subterrâneos, retirada de combustíveis fósseis em bacias de subsuperfície (petróleo, gás), detonação de minas e abertura de túneis, carregamento de água em barragens, implosão e conseqüente queda de edifícios, etc. Apesar de provocarem vibrações no terreno, eles não se enquadram como sismos no *stricto sensu*.

Alguns exemplos deste fenômeno têm sido associados à construção de grandes barragens e o conseqüente enchimento de seus reservatórios, como ocorrido na Barragem



de Kariba, no Zâmbia; e na região de Koyna, a oeste de Madrastra, na Índia, onde um sismo induzido por esta causa ocorreu em 10 de dezembro de 1967, com magnitude de 6,3 na escala Richter.

Podem também ser provocados por explosões nucleares, que resultam em uma vibração de alta magnitude, como ocorrido em 1961 pela detonação da bomba nuclear soviética de 50 megatoneladas, chamada TSAR, que criou um sismo comparável aos de magnitude 7 (Escala Richter), produzindo vibrações tão fortes que foram registradas nas terras antípodas.

Para dar efeito ao “*Tratado de Não Proliferação de Armas Nucleares*”, a Agência Internacional de Energia Atômica usa as ferramentas da sismologia para detectar atividades ilícitas, tais como os testes de armamento nuclear, através dos quais é possível determinar exatamente onde ocorreu uma explosão.

### **3.4 MÉTODOS DE ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE ENCOSTAS**

Analisar a estabilidade de um talude rochoso é determinar o quão próximo da ruptura o mesmo se encontra, e para isso existem alguns métodos.

Para a escolha do método que melhor se enquadra é imprescindível identificar primeiramente o modelo que melhor se ajusta ao movimento ocorrido.

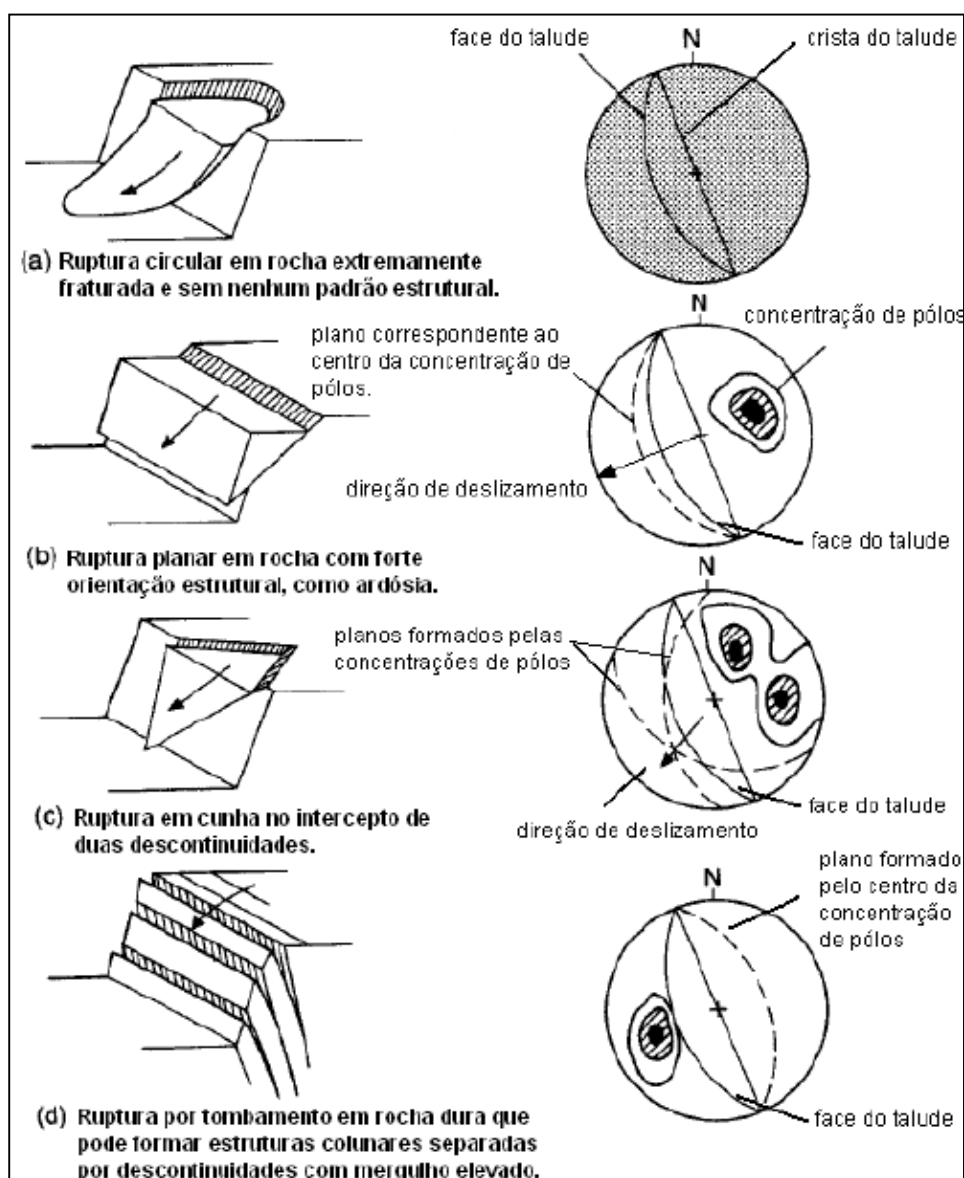
Na área de estudo, os escorregamentos translacionais, ou planares, são os mais expressivos e ocorreram em dois horizontes:

- ao longo de planos de descontinuidade em rocha (descomprimida e alterada);
- no contato colúvio x rocha (descomprimida e alterada), quando referente à reativação de escorregamentos já deflagrados.

Para esta configuração de geometria de ruptura, dentre os métodos usuais de análise de estabilidade de encosta, podem ser citados os pautados na projeção estereográfica, e os determinísticos, baseados na teoria do equilíbrio-limite.

## 3.4.1 MÉTODO POR PROJEÇÃO ESTEREOGRÁFICA

A projeção estereográfica consiste na representação espacial das relações entre as atitudes das estruturas geológicas presentes no maciço rochoso e as atitudes dos taludes. Sua análise auxilia na previsão da geometria mais provável da instabilização.



**Figura 3-9.** Principais tipos de deslizamentos e estereogramas correlacionados.

Fonte: Hoek e Bray (1981) apud Fiori e Carmignani (2009), pg.479

Na Figura 3-9 são mostrados quatro tipos de estruturas de ruptura em relação à distribuição espacial das estruturas geológicas. Na análise da estabilidade de um talude com base neste método é imprescindível que o plano do talude seja incluído no estereograma já

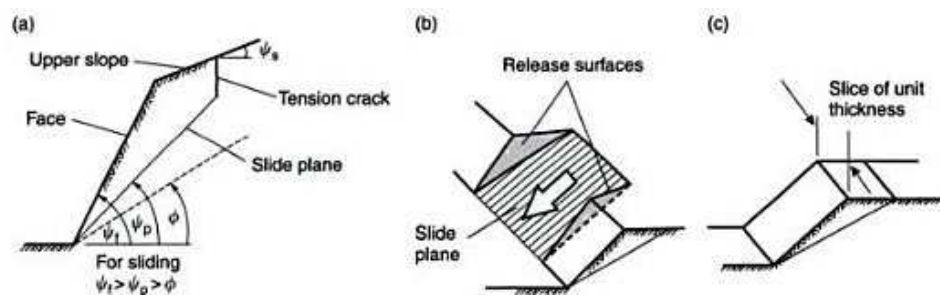
que a ruptura somente poderá ocorrer como consequência de movimento em direção à face livre da encosta, como citado por Fiori *op. cit.* Os diagramas obviamente são simplificados, e podem ocorrer na realidade movimentos mais complexos. Uma análise feita com base neste método é mais eficiente quando as estruturas do maciço rochoso são bem marcantes, e por isso é mais empregado na análise de escorregamentos planares ou em cunha, definidos por um único plano ou por dois, respectivamente.

A estabilidade dos taludes por meio de projeção estereográfica é analisada com base nas atitudes dos planos de fraqueza do maciço rochoso em relação à atitude da vertente, e considera ainda o ângulo de atrito ( $\phi$ ) atuante ao longo destes planos. Com base nisto, sua aplicação em Mazar foi efetuada com base nos planos de ruptura ocorridos ao longo de descontinuidades presentes no horizonte de rocha descomprimida e alterada.

#### 3.4.1.1 Análise estereográfica para escorregamento planar

A presença de planos de foliação, xistosidade e fraturas nas rochas de Mazar condiciona a ocorrência preferencial de escorregamentos planares. Estes movimentos necessitam de algumas condicionantes para deflagrarem, como define Pyke (1999):

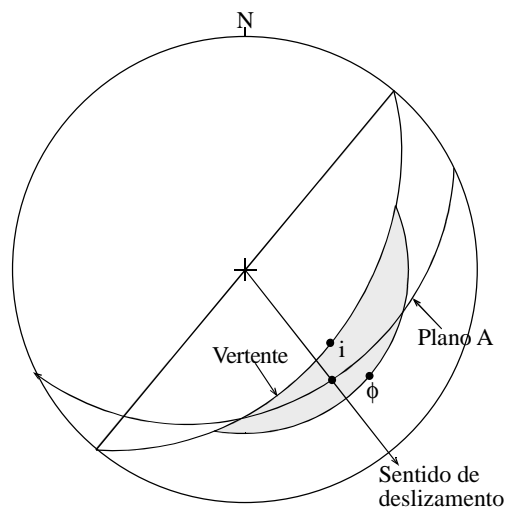
- em condição drenada, isto é, sem presença de água estagnada, o ângulo de mergulho do plano de deslizamento deve ser maior que o ângulo de atrito do mesmo (Figura 3-10a);
- o plano de escorregamento deve ser paralelo ou subparalelo à superfície do terreno, numa variação de no máximo 20° deste (Figura 3-10b);
- o plano descontínuo com potencial de deslizamento deve aflorar na superfície do terreno, o que significa que o mergulho deste plano deve ser menor que o do terreno (Figura 3-10c).



**Figura 3-10.** Condições para que ocorra escorregamento planar.

Fonte: Pyke (1999)

Uma das maneiras de diagnosticar o potencial de ruptura planar é por meio da interpolação dos dados da orientação da vertente, natural ou artificial, e o ângulo de atrito da superfície descontínua. Ambas são representadas em *overlay*, sobre o estereograma de dados estruturais contornados (pólos ou rumos de mergulhos), como o de Schmidt-Lambert. Se coincidirem, o potencial de escorregamento é confirmado, como mostra a Figura 3-11:



**Figura 3-11.** Modelo de diagrama diagnosticando ruptura planar.

Fonte: Fiori e Carmigani (2009), pg. 483

### 3.4.2 MÉTODO DETERMINÍSTICO

O método determinístico mensura a estabilidade de uma encosta pela razão entre as forças de resistência ao movimento e as forças solicitantes do mesmo, numa relação matemática expressa pelo coeficiente ou Fator de Segurança (FS) que indica o quão próximo da ruptura a mesma se encontra, conforme Eq. 3-2.

$$\text{Eq. 3-2} \quad FS = \frac{\text{Forças\_resistentes}}{\text{Forças\_solicitantes}}$$

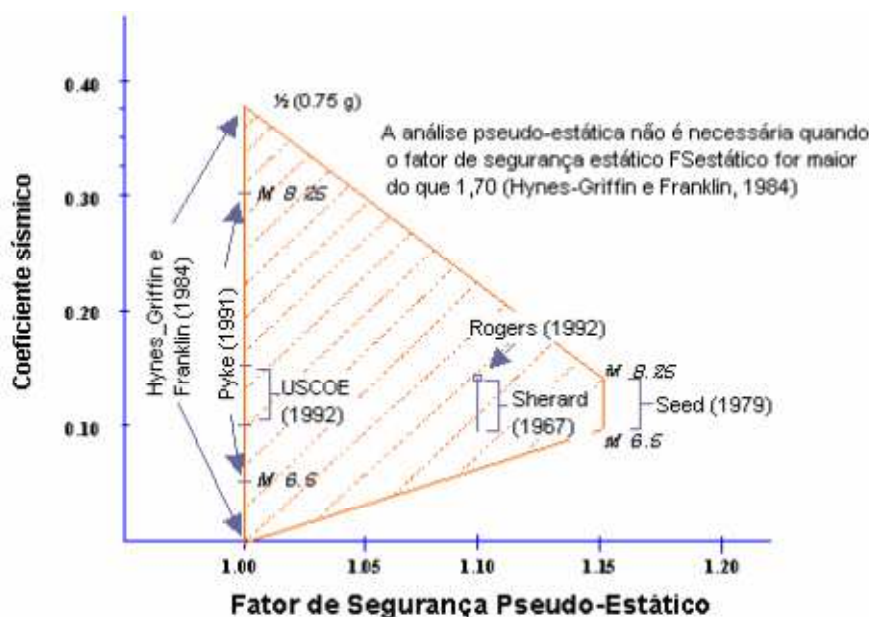
Para uma análise estática, sem consideração da atuação sísmica, quando as forças se equivalem tem-se um coeficiente unitário ( $FS=1$ ) indicativo de uma situação chamada de equilíbrio-limite. Quando as forças solicitantes excedem às de resistência, o coeficiente resulta menor que 1 ( $FS<1$ ) indicando uma vertente instável. Do contrário, quando as forças de resistência superam as solicitantes, tem-se um coeficiente maior que 1 ( $FS>1$ ) e a condição da encosta é considerada estável (Quadro 3-8).

**Quadro 3-8.** Fatores de Segurança em uma análise estática.

FS	Estabilidade da encosta para análise estática
= 1	Equilíbrio-limite
< 1	Instável
> 1	Estável

Para uma análise pseudo-estática, ou dinâmica, na qual a ação sísmica é incluída, a situação de equilíbrio-limite deixa de ser unitária e passa a depender do coeficiente sísmico ao qual a encosta estará sujeita, sendo este valor acrescido à unidade.

A Figura 3-12 mostra a variação dos valores de Fator de Segurança pseudo-estáticos recomendados na literatura em função dos coeficientes sísmicos e da magnitude do terremoto. De acordo com Kramer (1996), ainda que o julgamento de engenharia seja fundamental em todos os casos, o critério de Hynes-Griffin e Franklin (1984) é considerado apropriado para a maioria dos taludes, e descartado quando o FS estático for maior que 1,7.



**Figura 3-12.** Intervalo de variação de FS em função do coeficiente sísmico ( $K_h$ ) e da magnitude do terremoto.

Fonte: California's Seismic Hazards Mapping Act apud Morote (2006), pg. 29

Se consideradas as recomendações dos autores referenciados na Figura 3-12, o valor mínimo aceitável do Fator de Segurança pseudo-estático proposto em função do coeficiente sísmico ( $K_h$ ) variaria entre 1 e 1,15.

No caso de Mazar, cujo coeficiente sísmico deduzido para os escorregamentos ocorridos é de 0,05g (considerando um sismo entre 3,5 e 4 de magnitude) e o de projeto é 0,14g (para um evento de magnitude 7,5), os Fatores de Segurança de equilíbrio-limite nestas situações são iguais a 1,05 e 1,14, respectivamente (ver Quadro 3-9).

**Quadro 3-9.** Fatores de Segurança para análise pseudo-estática em Mazar.

	Evento dinâmico		Estabilidade da encosta para análise pseudo-estática
	Sismo baixo a médio deflagrador de escorregamentos na área de estudo	Pior sismo estimado para fins de projeto	
FS	= 1,05	= 1,14	Equilíbrio-limite
	< 1,05	< 1,14	Instável
	> 1,05	> 1,14	Estável

A existência de uma situação de equilíbrio-limite é o ponto de partida dos métodos determinísticos que a consideram uma condição de equilíbrio ótima com a qual é possível comparar o estado no qual um talude se encontra. Embora bastante criticado, continua sendo o método mais utilizado por profissionais da área de geotecnia. A grande vantagem atribuída por Mostyn e Small (1987) a este método é a simplicidade e a facilidade de aplicação. Em contrapartida, a simplificação dos mesmos pode comprometer os resultados, segundo afirma Ahrendt (2005). Para atribuir maior credibilidade a este método faz-se uso de informações geotécnicas reais com as quais se compara e avalia-se o resultado alcançado. A manipulação dos dados em ambiente *GIS* (*Geographic Information System*) é outro grande aliado na aplicação de métodos determinísticos, pois permite lidar com uma gama de informações muito grande e processá-las a fim de gerar mapas que auxiliem na visualização de áreas mais ou menos instáveis, como exposto no Capítulo 5.

#### 3.4.2.1 Método Determinístico por Retroanálise

Por retroanálise entende-se toda a análise feita em taludes após a ruptura ter ocorrido no intuito de se obter os parâmetros físicos de resistência que atuavam no momento exato antes do escorregamento ter acontecido. Através destes, prevê-se o



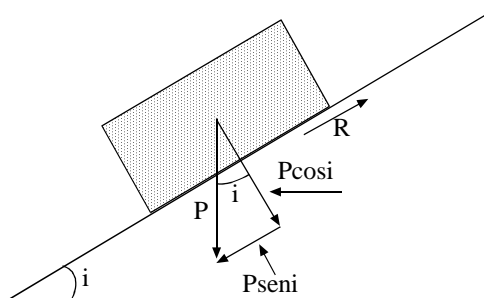
comportamento e o Fator de Segurança de outras vertentes com características geológicas semelhantes às daquelas dos taludes rompidos e que se encontram em situações parecidas.

Os parâmetros físicos de resistência determinados por retroanálise são a coesão ( $c$ ) e o ângulo de atrito interno ( $\phi$ ), grandezas inversamente proporcionais a partir das quais se determina o coeficiente de segurança (FS). Solos e rochas têm valores de ( $c$ ) e ( $\phi$ ) característicos, e quando determinados por retroanálise, parte-se do pressuposto que no exato momento da ruptura a coesão era inexistente e a condição de FS estava no seu equilíbrio-limite. Com isso o cálculo resulta em um ângulo de atrito ( $\phi$ ) superestimado.

Em se tratando de ruptura em maciço rochoso, ou pelo menos na superfície de contato solo x rocha, os atributos de resistência retroanalizados referem-se aos valores de coesão e atrito atuantes ao longo do plano cisalhado. Isto tem a ver com as características das discontinuidades em si e seu material de preenchimento.

### 3.5 ANÁLISE DE RUPTURA PLANAR

Em teoria, uma encosta está submetida basicamente a três campos de forças distintos, as quais são: forças devidas ao próprio peso ( $P$ ), forças devidas ao escoamento de água ( $F_p$ ) e outras decorrentes da resistência ao cisalhamento ( $R$ ). Sua estabilidade dependerá do equilíbrio entre estas forças, enquanto sua instabilidade ocorrerá quando a soma das duas primeiras sobressair à última.



**Figura 3-13.** Decomposição da força ( $P$ ) em força normal ( $P\cos i$ ), tangencial ( $P\sin i$ ) e de resistência ( $R$ ).

*Fonte: Fiori e Carmignani (2009), pg.170*

Decompondo estas forças, conforme exemplificado na Figura 3-13 onde um bloco está apoiado em uma superfície inclinada de ângulo ( $i$ ), identificam-se os vetores daquelas

que atuam em prol do movimento, os quais são  $P_{seni}$  e  $P_{cosi}$ . A direção do vetor da força resistente ( $R$ ) é dada pela equação  $R=\tau A$ , onde ( $\tau$ ) é a resistência ao cisalhamento no contato bloco-plano inclinado definido pela Lei de Coulomb, e ( $A$ ) é a área do bloco. Por esta lei, entende-se que a força de resistência depende diretamente dos parâmetros geotécnicos ( $c$  e  $\phi$ ) do sistema.

Por observação de campo e para fins de análise de estabilidade, as encostas da área de estudo são consideradas genericamente como infinitas, dado que a maioria dos escorregamentos se deu ao longo dos planos de foliação que se estendem quase paralelamente à superfície dos terrenos; compostas por maciços rochosos alterados e descomprimidos, cobertos por uma fina camada de solo de até 2m de espessura, com fluxo de água subsuperficial paralelo à superfície do terreno, com linhas equipotenciais perpendiculares ao mesmo. Admite-se que a condutividade hidráulica do maciço determina a capacidade deste em conduzir a água à jusante através da vertente. A rede hidrográfica não precisa, necessariamente, ocupar toda a profundidade do horizonte composto por rocha de alteração, mas a porção que atravessa é considerada saturada.

Neste contexto, a análise da estabilidade foi feita para duas situações: estática e a pseudo-estática, ou dinâmica, cujas equações são definidas a seguir.

### 3.5.1 ANÁLISE ESTÁTICA

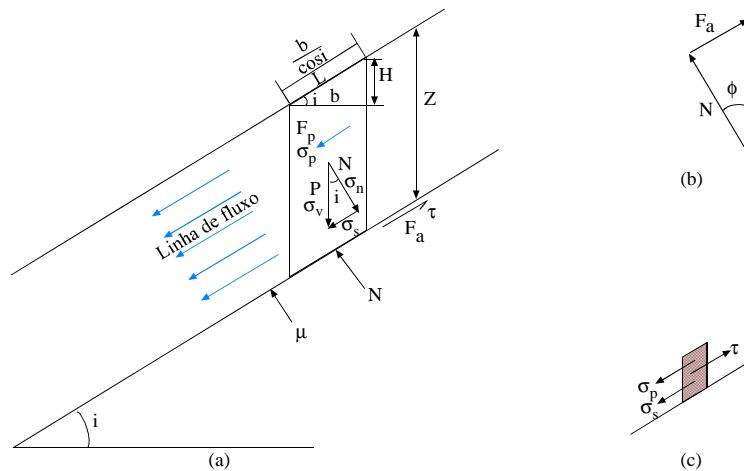
Na análise estática da estabilidade de uma vertente é considerada a variação das propriedades intrínsecas, como o nível de saturação e a presença ou não de vegetação. No caso de Mazar a vegetação foi desprezada em virtude de ser constituída por arbustos, gramíneas ou culturas agrícolas de pequeno porte, os quais não têm efeito de tração nos movimento das encostas.

#### **VERTENTE SEM VEGETAÇÃO E COM ÁGUA:**

A vegetação característica de zonas geomorfológicas de alta colina, composta por árvores de estatura média e raízes pouco profundas, tem sido retirada por ação antrópica dando lugar ao plantio de subsistência nas encostas da região de estudo. Esta realidade

condiciona vertentes expostas quase que diretamente aos efeitos das chuvas, e submetidas apenas ao próprio peso, uma vez que o peso decorrente do plantio é desprezível como efeito na resistência aos escorregamentos.

A decomposição dos vetores das forças atuantes sobre um talude com estas características está na Figura 3-14a, onde  $Z$  é a espessura de horizonte de rocha alterado,  $i$  é a inclinação da vertente, e a linha de fluxo de água perpassa toda a espessura do horizonte acima da superfície de ruptura considerada. Por este esquema, identificam-se as forças indutivas de movimento, as quais são: tensão cisalhante ( $\sigma_s$ ), derivada da decomposição da tensão vertical ( $\sigma_v$ ) exercida pelo peso da rocha alterada; e a pressão de percolação ( $\sigma_p$ ). A tensão normal ( $\sigma_n$ ) é anulada por uma força de sentido contrário e igual intensidade, conforme enunciado pela 3ª Lei de Newton. A força que se opõe ao movimento, definida por Coulomb como ( $\tau$ ), é resultante da força de atrito ( $F_a$ ), como demonstrado na Figura 3-14b.



**Figura 3-14.** Forças atuantes em vertente ilimitada, sem cobertura vegetal e com fluxo de água sub-superficial.

Fonte: Fiori e Carmignani (2009), pg.179

Em se tratando de um sistema com presença de água, é necessário ajustar os valores das tensões atuantes eliminando de cada uma delas a força exercida pela pressão neutra ( $\mu$ ), que corresponde à altura da coluna de água no meio. Assim, a força ( $P$ ) é reduzida a um valor efetivo ( $P_e$ ) quando é eliminado dela o peso exercido pela coluna de água, como rege o Empuxo de Arquimedes. Uma vez que a força ( $P$ ) determina as tensões ( $\sigma_v$ ) e ( $\sigma_n$ ), estas também são modificadas pela ação da água, assumindo valores efetivos

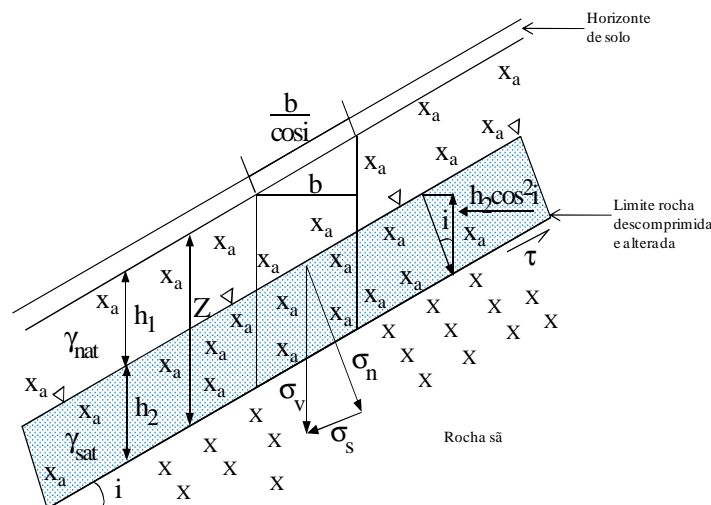
( $\sigma_{ve}$  e  $\sigma_{ne}$ ), e, conseqüentemente, a tensão cisalhante também se torna efetiva ( $\sigma_{se}$ ).

A força de percolação exercida pela rede de fluxo de água ( $F_p$ ) considera a inclinação da vertente, o volume de material percolado e o peso específico da água ( $\gamma_a$ ). A pressão de percolação ( $\sigma_p$ ) resulta da distribuição daquela força pela área ( $F_p/A$ ), e se torna efetiva ( $\sigma_{pe}$ ) quando considerado o efeito da poro-pressão. Uma vez que esta pressão está diretamente relacionada à altura do nível de água no horizonte de solo e de rocha alterada, seu valor máximo será atingido geralmente no final de períodos chuvosos, quando do acúmulo de infiltração de várias chuvas. Seu valor mínimo será estabelecido ao final de períodos secos, quando o nível freático alcança seus menores valores.

Por estas definições, e conhecendo que o Fator de Segurança é dado pela razão entre as tensões que atuam no sentido de impedir o movimento e as que são favoráveis a ele, pode-se reajustar a relação para a seguinte equação (Eq. 3-3):

$$\text{Eq. 3-3} \quad FS = \frac{\tau}{\sigma_{pe} + \sigma_{se}}$$

Se o nível freático estiver a uma profundidade menor que a espessura do solo e da rocha descomprimida e alterada, o cálculo das tensões efetivas considera somente a porção saturada destes materiais, na qual a pressão neutra atua e os vetores das forças atuantes se direcionam como mostra a Figura 3-15.



**Figura 3-15.** Parâmetros envolvidos na análise de vertente infinita sem cobertura vegetal, com nível freático ( $h_2$ ) e fluxo subsuperficial paralelo à declividade do terreno.

Fonte: Fiori e Carmignani (2009) modificado, pg.181

Para um ponto qualquer situado em um prisma da vertente com tais características, as forças solicitantes de movimento resultarão da soma das tensões atuantes na região sem água com as tensões calculadas para a porção saturada, fazendo com que a equação se resuma à Eq. 3-4.

$$\text{Eq. 3-4} \quad FS = \frac{c + (\gamma - m\gamma_a)Z \cos^2 i \tan \phi}{Z \gamma \sec i}$$

Onde:

c = coesão do material;  
 $\gamma$  = peso específico do material;  
 $m = h_2/Z$ ;  
 $h_2$  = altura do nível de água acima do plano de ruptura;  
 $Z$  = profundidade do plano de ruptura;  
 $\gamma_a$  = peso específico da água;  
 $i$  = ângulo de inclinação da vertente;  
 $\phi$  = ângulo de atrito do material.

A variável (m) da equação acima representa a espessura de água no horizonte de solo e rocha descomprimida e alterada em relação à espessura total de ambos. Assim, o cálculo de Fator de Segurança pode ser efetuado simulando diversos graus de saturação do meio. Quando m for 0 significa que a vertente está seca, e quando for 1 significa que o nível freático atingiu a superfície.

### 3.5.2 ANÁLISE PSEUDO-ESTÁTICA

Na análise pseudo-estática ou dinâmica de uma vertente, além das características intrínsecas observadas na análise estática, são ainda considerados os efeitos provocados por sismos. Segundo Guillén (2004), tais efeitos são representados por pseudo-acelerações horizontal e vertical constante que produzem forças inerciais aplicadas no centro de gravidade da massa deslizante, porém em sentido oposto ao das forças inerciais geradas pela propagação da excitação sísmica (princípio d'Alembert).

A primeira aplicação deste procedimento foi atribuída a Terzaghi (1950). É um método simples, atualmente incorporado em programas computacionais para análise da estabilidade sísmica de taludes, para superfícies potenciais de rupturas planas e curvas.

Quando se trata de definir o coeficiente de segurança para situação pseudo-estática, o valor mínimo aceitável difere do valor unitário, pois se entende que a condição de equilíbrio-limite foi modificada pela ocorrência sísmica, elevando o valor de estabilidade crítico acima do teórico normal, conforme Bray *et al.* (1995). No caso de Mazar, este coeficiente, para fins de retroanálise, foi estimado em 1,05, pois o evento deflagrador dos escorregamentos já ocorridos presume-se que tenha sido um tremor com magnitude entre 3,5 e 4, e com coeficiente sísmico de  $0,05\text{cm/s}^2$ , conforme já discorrido (INECEL, 1998).

### **VERTENTE SEM VEGETAÇÃO, COM ÁGUA E AÇÃO SÍSMICA:**

Para a determinação do Fator de Segurança de uma vertente nestes moldes é considerada a mesma decomposição das mesmas forças atuantes nas vertentes, como explicado no item anterior. Porém, o diferencial neste caso é a inclusão do efeito da aceleração sísmica no modelo de talude infinito, representado pelo coeficiente sísmico  $K_h$ . Quando isto ocorre, a Eq. 3-4 apresentada anteriormente se converte na Eq. 3-5 abaixo:

$$\text{Eq. 3-5} \quad FS = \frac{c + (Z\gamma \cos^2 i - Z\rho K_h \cos i \sin i - \gamma_a h_2 \cos^2 i) \tan \phi}{Z\gamma \sin i \cos i + Z\rho K_h \cos^2 i}$$

Onde:

- c = coesão do material;
- $\gamma$  = peso específico do material;
- $h_2$  = altura do nível de água acima do plano de ruptura;
- Z = profundidade do plano de ruptura;
- $\gamma_a$  = peso específico da água;
- i = ângulo de inclinação da vertente;
- $\phi$  = ângulo de atrito do material;
- $\rho$  = massa específica do material;
- $K_h$  = coeficiente de aceleração sísmica.

Segundo a fórmula acima, é possível simular diversos Fatores de Segurança com base na variação do nível freático, representado pelo coeficiente  $h_2$ ; em diferentes situações de aceleração sísmica ( $K_h$ ); e considerando ainda profundidades diferentes do plano de ruptura (Z), quer seja no contato solo x rocha, ou em algum plano inserido no próprio horizonte de rocha descomprimida e alterada, ou ainda no contato deste com a rocha sã.

A aplicação das equações de simulação e seus resultados estão no Capítulo 5.



# CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO GEOTÉCNICA DA ÁREA DE ESTUDO

A área de interesse específico para fins de estudo na região de Mazar limita-se a uma faixa ao longo do reservatório da hidroelétrica, desde a cota máxima deste à 2.200m, até a elevação 2.800m. Assim, as características geotécnicas descritas neste capítulo se resumem aos colúvios e rochas presentes ao longo desta região que, em termos de litologia, abrange exclusivamente os xistos e filitos das unidades El Pan e Alao-Paute.

## 4.1 MÉTODO DE CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO

Por meio de restituição aerofotogramétrica definiu-se cicatrizes de escorregamento nas encostas ao longo do reservatório. Estas foram agrupadas em 11 zonas homólogas por conta da proximidade entre si e por resultarem do mesmo agente deflagrador.

As zonas instáveis foram subdivididas em duas categorias: antigas e recentes. Na primeira categoria enquadraram-se as zonas identificadas tanto em fotos aéreas do ano de 1983 como de 1996, provavelmente geradas por um evento sísmico de magnitude baixa a média (3,5 a 4 na Escala Richter), ocorrido nos últimos 50 anos conforme INECCEL (1998), e que foram reativadas com a passagem da cheia La Josefina. Na segunda categoria enquadram-se as zonas de escorregamento observadas somente em fotografias aéreas do ano de 1996.

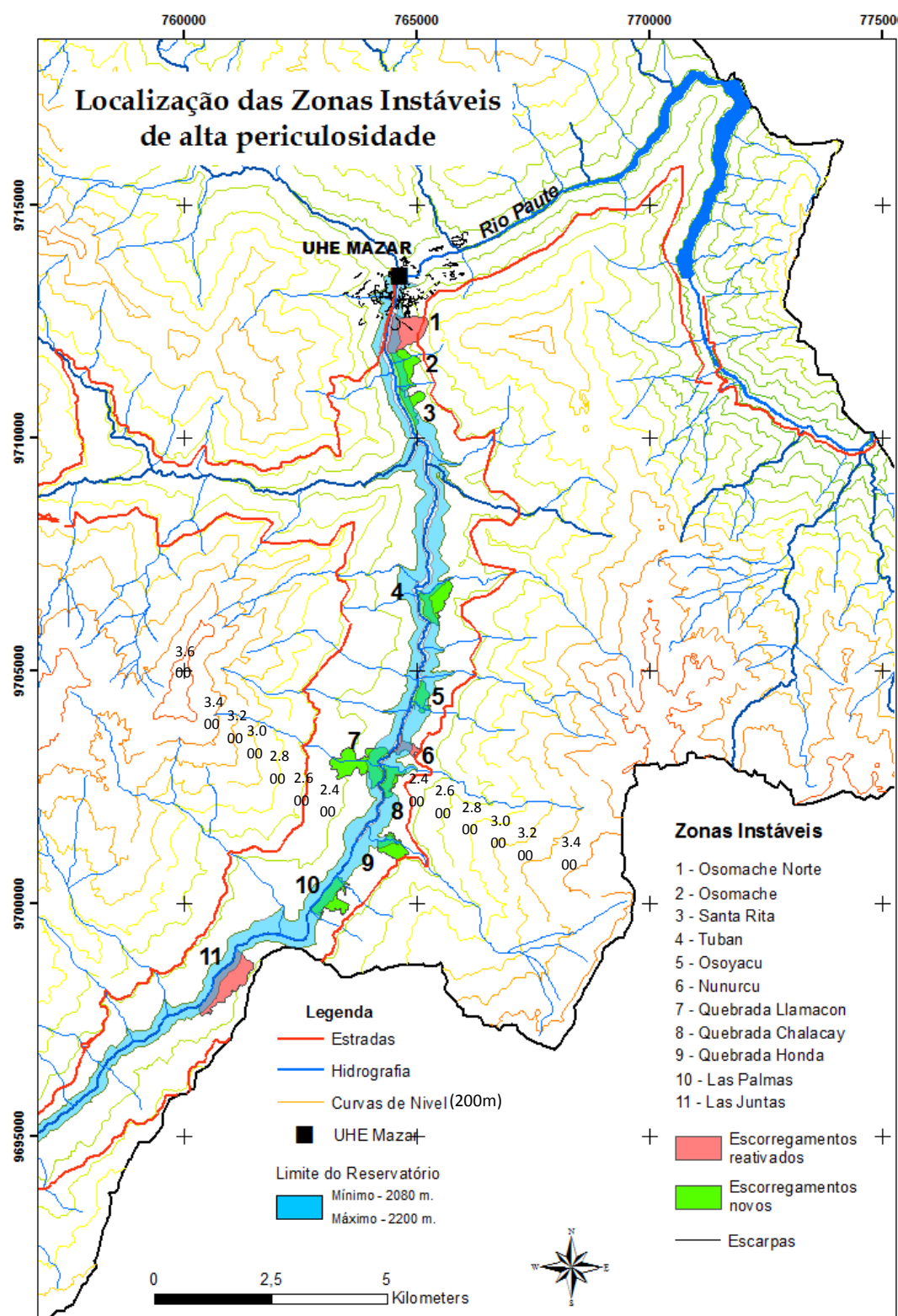
Tais zonas coincidem com as classificadas pelo Consórcio Gerência Mazar (CGM) como de maior periculosidade pelos riscos que apresentam à UHE Mazar em função de suas dimensões e proximidade com as obras civis, inclusive com a própria barragem. Em sua maioria, estas zonas estarão expostas à saturação e flutuação do rio Paute por conta da variação do reservatório, podendo se reativar e desencadear importantes movimentos de massa, comprometendo a geração de energia e a integridade das obras civis.

No documento intitulado “*Evaluación de la estabilidad de laderas en el embalse Mazar*” (CGM, 2007) consta a caracterização e classificação geotécnica dos solos e rochas que compõem estas zonas de forma minuciosa, elaborada a partir da restituição aerofotogramétrica, levantamento geológico detalhado em escala 1:5.000, visitas a campo e classificação geomecânica pelo método RMR (Bieniawski, 1973).

Adicionalmente, o consórcio fez uma campanha de investigações de exploração geofísica utilizando técnicas de sísmica de refração (SR) e sondagens elétricas verticais (SEV) com a finalidade de determinar a profundidade e geometria do contato solo/rocha. Também foram coletadas amostras deformadas do material instabilizado para ensaios de caracterização, e amostras indeformadas de solo e rocha para determinação de parâmetros geotécnicos de resistência.

Por este motivo, lançou-se mão das informações contidas na referente bibliografia disponibilizada pelo próprio CGM, aliada às minhas observações feitas em viagem a campo e análises aerofotogramétricas, para compor os quadros-resumo dos próximos subitens. Nestes têm-se um panorama geral de cunho geotécnico de cada zona instável e outras informações necessárias que deram subsídio para a compreensão da área como um todo e contribuíram para as análises de estabilidade.

O limite da região caracterizada geotecnicamente e a localização das zonas homólogas de instabilidade, com seus nomes de acordo com o especificado no trabalho de CGM (2007), estão na Tabela 4-1. Nota-se que a maioria concentra-se na margem direita do rio Paute, onde os mergulhos das foliações concordam com a declividade dos taludes.




**Figura 4-1.** Limite da área caracterizada e zonas instáveis de alta periculosidade.

Os caminhamentos elétricos perpendiculares às curvas de nível ao longo dos maiores eixos das cicatrizes de escorregamento, executados pelo CGM, estão incluídos na Figura 4-2.

## Detalhe das Zonas Instáveis

### Legenda

- Estradas
- Hidrografia
- Curvas de Nível
- Escorregamentos
-  Escarpas
- + + Perfis geofísicos



### Zonas Instáveis

- 1 - Osomache Norte
- 2 - Osomache
- 3 - Santa Rita
- 4 - Tuban
- 5 - Osoyacu
- 6 - Nunurcu
- 7 - Quebrada Llamacon
- 8 - Quebrada Chalacay
- 9 - Quebrada Honda
- 10 - Las Palmas
- 11 - Las Juntas

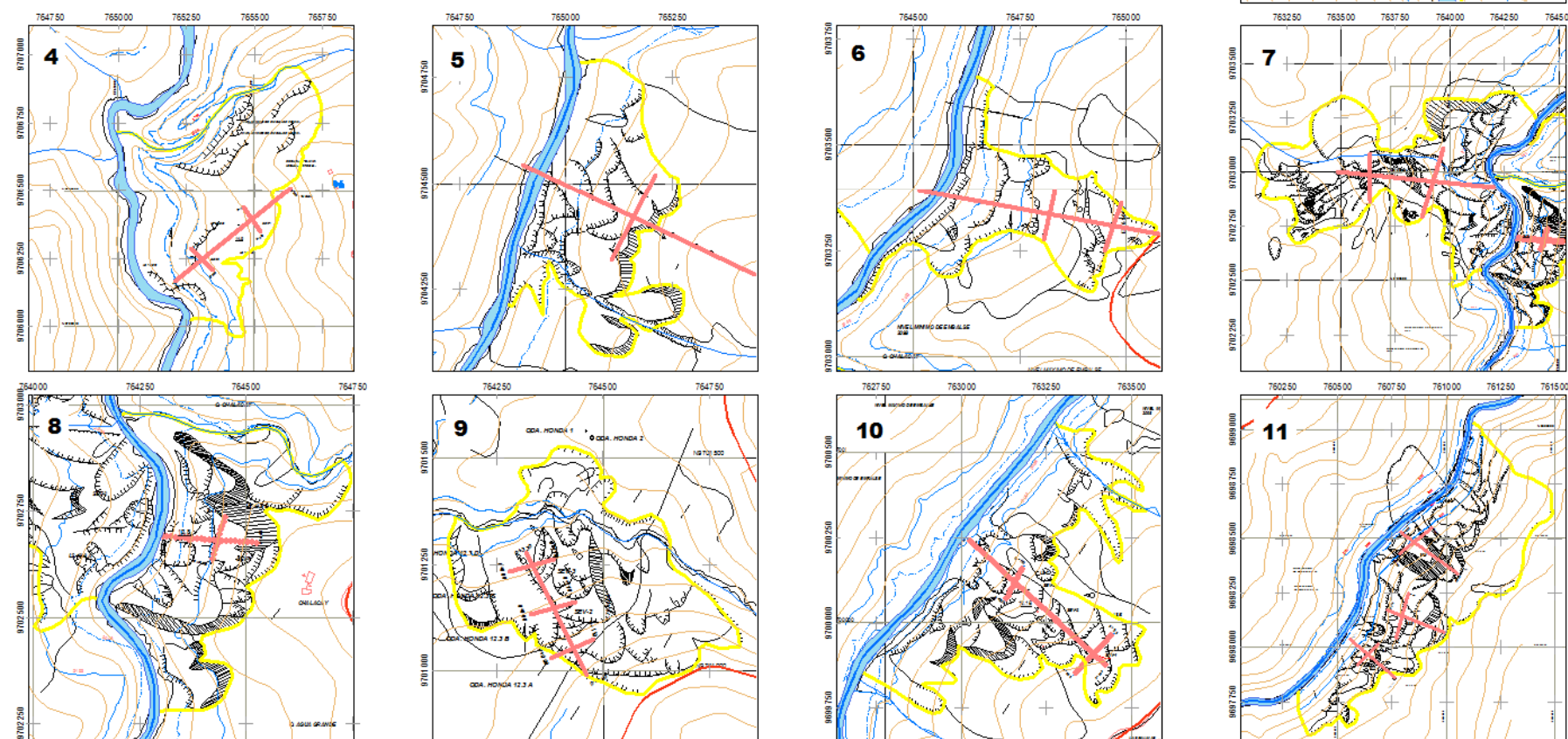


Figura 4-2. Detalhe dos escorregamentos das zonas de maior periculosidade com sobreposição de linhas sísmicas.

#### 4.1.1 INTERPRETAÇÃO GEOFÍSICA

Pelas interpretações geofísicas com base nas velocidades de propagação, definiram-se os diferentes horizontes de material logo abaixo do solo residual, como mostra o Quadro 4-1.

**Quadro 4-1.** Horizontes interpretados por sismica de refração.

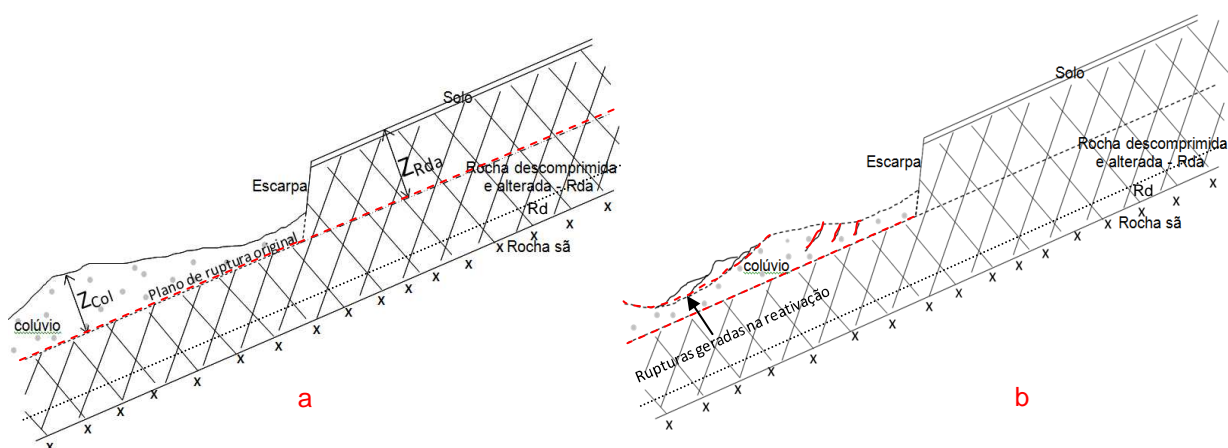
Horizonte litológico		Velocidade de propagação	Características
Colúvio	A	200-320m/s	Matriz pelítica, em parte orgânico, suporta cascalho e matacões, alta plasticidade, consistência solta, umidade ~ 50%.
	B	320-780m/s	Matriz pelítica, suporta cascalhos e blocos angulares a subangulares, alta plasticidade, consistência firme, umidade > 50%.
	C	780-820m/s	Matriz pelítica, suporta massas de rocha fragmentada, consistência mais firme, umidade baixa.
Rocha	Rocha descomprimida e alterada (Rda)	~1.200m/s	Rocha fortemente fraturada e alterada, zonas milonitizadas por cisalhamento, umidade alta.
	Rocha descomprimida (Rd)	~2.100m/s	Rocha fortemente fraturada, umidade baixa.
	Rocha sã	~3.800m/s	Maciço pouco fraturado e quase sem água.

Conforme o quadro acima, para o colúvio, formado essencialmente pelo material deslizado com alto percentual de fração detrítica, identificou-se três horizontes distinguidos aqui como A, B e C. O primeiro (A) é composto por um solo pelítico de alta plasticidade sustentando cascalhos e matacões, em parte orgânico e de consistência solta, com velocidades compreendidas entre 200m/s e 320m/s. Esta unidade está exposta aos agentes meteóricos e tem uma umidade natural alta, da ordem de 50%. O horizonte intermediário (B), constituído por matriz pelítica sustentando cascalhos e blocos angulares a subangulares, apresenta velocidades de propagação entre 320m/s e 780m/s, resistividades que indicam umidade natural superior a do horizonte superficial e consistência mais dura. O terceiro horizonte de colúvio (C) é mais profundo, determinado por velocidades sísmicas compreendidas entre 780m/s e 820m/s que sugerem presença de massas de rocha fragmentada e alta resistividade elétrica, o que indica um baixo conteúdo de água.

No embasamento rochoso, identificaram-se três horizontes com base em velocidades de propagação resultantes da condição de descompressão, grau de alteração e presença de água. O horizonte mais superficial, chamado Rda, é constituído por rochas descomprimidas, fortemente fraturadas, com vários níveis alterados, zonas milonitizadas por cisalhamento e baixo conteúdo de água, resultando em velocidades de propagação em

torno de 1.200m/s. O nível intermediário, chamado Rd, é composto por rochas fraturadas onde o conteúdo de água é baixo e cuja velocidade de propagação média é de 2.100m/s. O nível mais profundo contém rochas pouco fraturadas ou sãs, praticamente sem água e com velocidades de propagação de 3.800m/s, aproximadamente.

Pela geofísica, interpretou-se um perfil litológico típico para as encostas onde o escorregamento se deu em horizonte de rocha descomprimida do tipo Rda, representado na Figura 4-3a, onde constam os seguintes elementos geométricos: plano de ruptura, escarpa, espessura da massa instabilizada ( $Z_{col}$ ) e a espessura da rocha descomprimida e alterada ( $Z_{Rda}$ ) acima do plano de ruptura. Supõe-se, hipoteticamente, que o plano original de ruptura de todos os escorregamentos, tanto antigos quanto recentes, localizava-se no horizonte de rocha descomprimida e alterada (Rda). No caso dos escorregamentos anteriores a 1983, sua reativação pela passagem da cheia La Josefina significou a mobilização de um determinado volume da massa que já havia sido instabilizada em evento anterior. Na remobilização destas zonas, o novo plano de ruptura ocorreu não mais no plano original, mas de forma circular no colúvio, ou no máximo no contato colúvio Rda, de forma planar, conforme mostra a Figura 4-3b. Para fins de análises, estas são as hipóteses avaliadas.



**Figura 4-3.** (a) Perfil típico de ruptura translacional em rocha descomprimida e alterada (Rda);  
(b) Perfil típico de reativação de escorregamentos em colúvio.

A seguir são apresentados os quadros-resumo (Quadro 4-2 a Quadro 4-12) com as principais características das zonas instáveis, compilado da literatura (CGM, 2007).

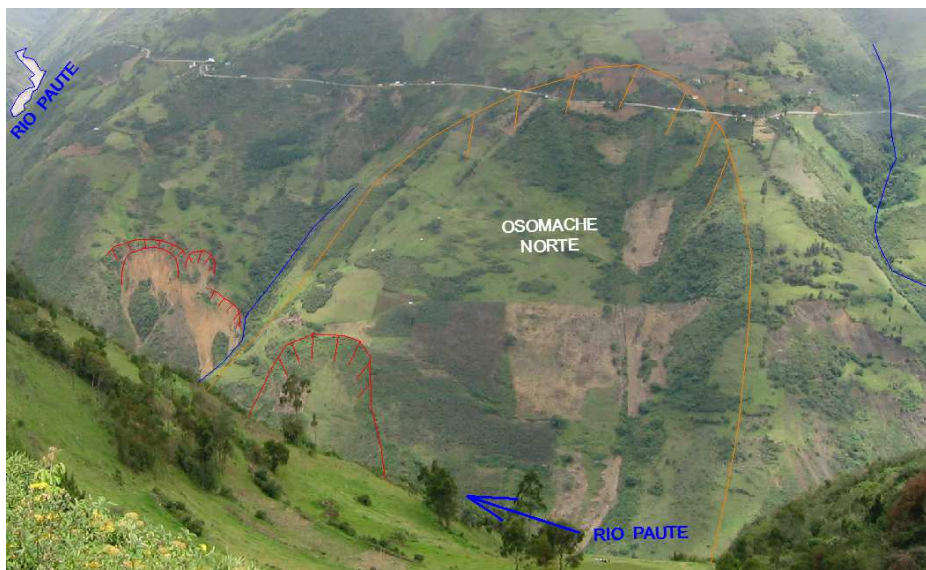


## 4.2 DESCRIÇÃO DAS ZONAS POTENCIALMENTE INSTÁVEIS

### 4.2.1 OSOMACHE NORTE

**Quadro 4-2.** Características do deslizamento Osomache Norte.

<b>Zona Instável</b> Osomache Norte	<b>Localização</b> Margem direita do rio Paute, 700m a montante da barragem.
--	---



Fonte: CGM

Características físicas da principal cicatriz de escorregamento	
Coordenadas	764.520E 9.712.450N
Tipo de instabilidade	Rejeitos de deslizamentos translacionais potencialmente ativos (latentes), com porções ativas na base. Reativação com a cheia La Josefina mobilizou colúvio.
Comprimento (m)	320
Largura (m)	130
Escarpa principal (m)	3
Espessura média (m)	20
Superfície (m <sup>2</sup> )	80.000
Volume (m <sup>3</sup> )	160.000
Tipo de relevo e declividade	Relevo regular / declividade do corpo do terreno 33°
Características do colúvio	
Granulometria dos blocos constituintes	>1m (2%); 0,5-1m (5%); 0,1-0,5m (10%); <0,1m (20%)
Matriz	Pelito-argilosa (63%)
Consistência	Firme a dura (estado seco); branda (estado saturado)
Diferentes horizontes do colúvio* <sup>1</sup>	Dois estratos: A - Mais superficial: 15-20m, B - Intermediário: até 30m
Características Geológicas do substrato	
Litologia	Unidade Alao-Paute: xistos cloríticos, sericíticos, e grafíticos alternando com quartzitos
Foliação* <sup>2</sup>	N70E/60SE
Fraturas principais* <sup>2</sup>	Uma família principal: N40W/50SW
Características das superfícies de descontinuidade	Planas, escalonadas ou rugosas; alteradas
Espaçamento das descontinuidades	Entre 15cm e 50cm
Continuidade	3m

<sup>\*1</sup> = determinado por interpretação geofísica;

<sup>\*2</sup> = atitude média

## 4.2.2 OSOMACHE

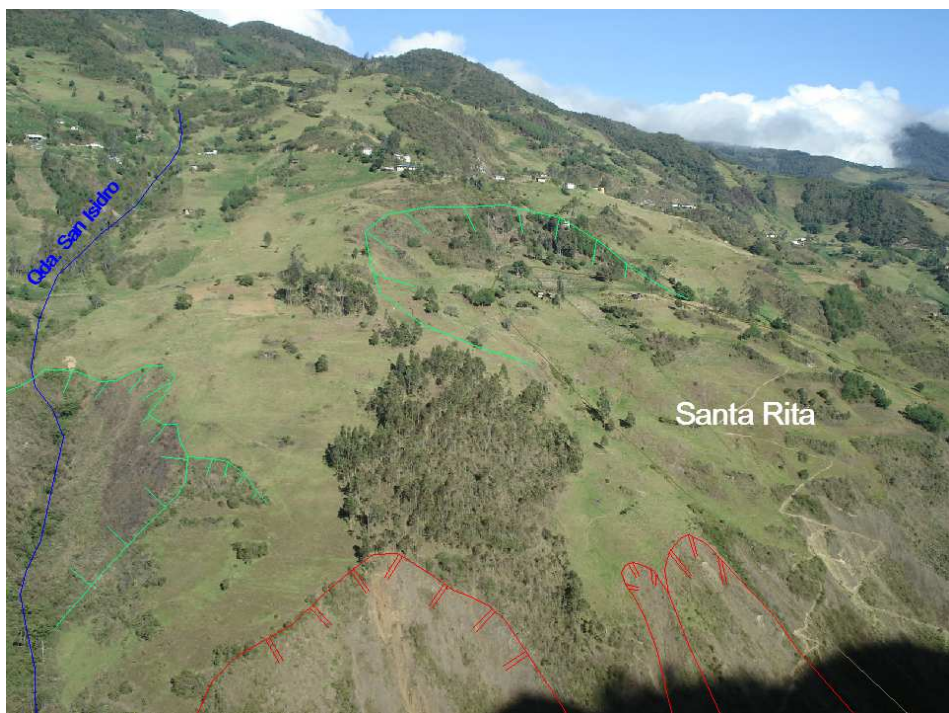
Quadro 4-3. Características do deslizamento Osomache.

</

\*<sup>1</sup> = determinado por interpretação geofísica;\*<sup>2</sup> = atitude média

## 4.2.3 SANTA RITA

**Quadro 4-4.** Características do deslizamento Santa Rita.


Zona Instável Santa Rita		Localização Margem direita do rio Paute, 2,6km a montante da barragem.
		
Fonte: CGM		
Características físicas da principal cicatriz de escorregamento		
Coordenadas	765.050E 9.710.875N	
Tipo de instabilidade	Rejeito de um deslizamento translacional, reativado no pé pela passagem da cheia La Josefina.	
Comprimento (m)	430	
Largura (m)	210	
Escarpa principal (m)	50	
Espessura média (m)	20	
Superfície (m <sup>2</sup> )	70.000	
Volume (m <sup>3</sup> )	1.420.000	
Declividade	45° no pé; 27° na zona de acumulação; 40° na escarpa principal	
Características do colúvio		
Granulometria do material constituinte	1-3m (3%); 0,5-1m (10%); 0,1-0,5m (20%); <0,1m (20%)	
Matriz	Pelito-argilosa (47%)	
Consistência	Firme a dura (estado seco); branda (estado saturado)	
Diferentes horizontes do colúvio* <sup>1</sup>	Dois estratos: A - Mais superficial: 1-5m, B - Intermediário: até 26m	
Características Geológicas do substrato		
Litologia	Contato das Unidades Alao-Paute e El Pan (região de contato): xistos cloríticos, sericíticos e grafíticos alternando com quartzitos	
Foliação* <sup>2</sup>	N20E/70SE	
Fraturas principais* <sup>2</sup>	Uma família: N70E/15SE	
Características das superfícies de descontinuidade	Planas, escalonadas ou rugosas; alteradas	
Espaçamento das descontinuidades	Entre 20cm e 50cm	
Continuidade	5m	
Espessura rocha descomprimida* <sup>1</sup>	20m	

\*<sup>1</sup> = determinado por interpretação geofísica;\*<sup>2</sup> = atitude média



## 4.2.4 TUBÁN

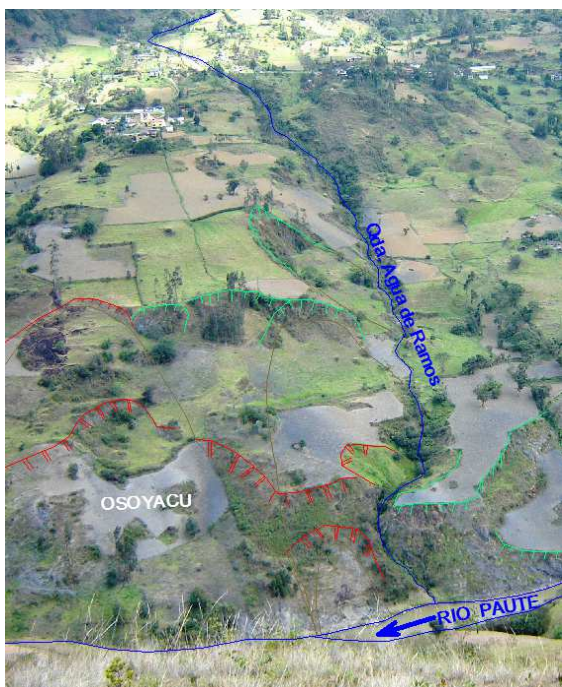
**Quadro 4-5.** Características do deslizamento Tubán.

Zona Instável Tubán		Localização Margem direita do rio Paute, 7,3km a montante da barragem.	
			
Fonte: CGM			
Características físicas da principal cicatriz de escorregamento			
Coordenadas	765.550E 9.706.500N		
Tipo de Instabilidade	Rejeito de um deslizamento translacional.		
Comprimento (m)	550		
Largura (m)	270		
Escarpa principal (m)	75		
Espessura média (m)	10		
Superfície (m <sup>2</sup> )	168.500		
Volume (m <sup>3</sup> )	1.685.000		
Declividade	49° na escarpa 16° média da zona de acumulação		
Características do colúvio			
Granulometria do material constituinte	>0,1m (10%); <0,1m (30%)		
Matriz	Pelito-argilosa (60%)		
Consistência	Firme a dura (estado seco); branda (estado saturado)		
Diferentes horizontes do colúvio* <sup>1</sup>	Dois estratos: A - Mais superficial: 1-8m, B - Intermediário: até 25m		Espessura média total: 25m
Características do terraço aluvionar antigo			
Matriz	Areia pelítica muito oxidada		
Características Geológicas do substrato			
Litologia	Unidade El Pan: xistos sericíticos, gráficas, cloríticos e quartzitos		
Foliação* <sup>2</sup>	N20E/70NW		
Fraturas principais* <sup>2</sup>	Uma família: N70E/15SE		
Características das superfícies de descontinuidade	Planas, escalonadas ou rugosas; alteradas		
Espaçamento das descontinuidades	3/m		
Continuidade	5m		
Tectonismo	Dobras e falhas		

\*<sup>1</sup> = determinado por interpretação geofísica;\*<sup>2</sup> = atitude média

## 4.2.5 OSOYACU


**Quadro 4-6.** Características do deslizamento Osoyacu.

Zona Instável Osoyacu		Localização Margem direita do rio Paute, 9.2km a montante da barragem.	
			
Fonte: CGM			
Características físicas da principal cicatriz de escorregamento			
Coordenadas	765.100E 9.704.400N		
Tipo de Instabilidade	Deslizamentos translacionais recentes e ativos na base, associados a outros antigos e estáveis no topo e base, ocorridos no contato colúvio x Rda, em profundidade máxima de 25m*1.		
Comprimento (m)	290		
Largura (m)	200		
Escarpa principal (m)	15		
Espessura média (m)	15		
Superfície (m²)	45.500		
Volume (m³)	685.000		
Características do colúvio			
Matriz	Argilosa (60%)		
Consistência	Firme a dura (estado seco); branda (estado saturado)		
Diferentes horizontes do colúvio*1	Dois estratos: A - Mais superficial: 1-4m B - Intermediário: até 12m		Espessura média total: 15m Espessura máxima: 25m (contato colúvio x rocha)
Declividade	45° na escarpa principal; 14° média da zona de acumulação; 45° no pé		
Características do terraço aluvionar antigo			
Material e matriz	Blocos de rochas metavulcânicas em matriz de areia argilosa muito oxidada		
Espessura do terraço	15m		
Características Geológicas do substrato			
Litologia	Unidade El Pan: xistos cloríticos, sericíticos, grafíticos e quartzitos		
Foliação*2	N15E/60SE-NW		
Fraturas principais*2	Família A: N40E/70NW Família B: N30W/60SW		
Características das superfícies de descontinuidade	Planas, escalonadas ou rugosas; alteradas		
Preenchimento das descontinuidades	Carbonato de cálcio		
Espessura rocha descomprimida*1	20m		

<sup>\*1</sup> = determinado por interpretação geofísica;<sup>\*2</sup> = atitude média

## 4.2.6 ÑUÑURCU

**Quadro 4-7.** Características do deslizamento Ñuñurcu.

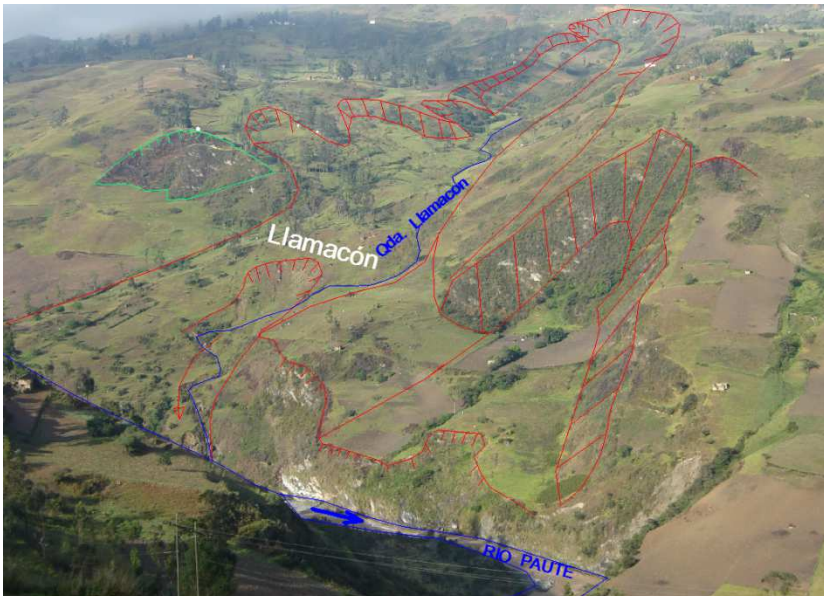
Zona Instável Ñuñurcu		Localização Margem direita do rio Paute, 10,3km a montante da barragem.	
			
Fonte: CGM			
Características físicas da principal cicatriz de escorregamento			
Coordenadas	764.800E 9.703.350N		
Tipo de Instabilidade	Intenso rastejo ativo em colúvio, promovido pela erosão na base causada pela passagem da cheia La Josefina.		
Comprimento (m)	400		
Largura (m)	300		
Escarpa principal (m)	5		
Espessura média (m)	5		
Superfície (m²)	95.000		
Volume (m³)	470.000		
Declividade	23° média		
Características do colúvio			
Matriz	Pelito-argiloso (70%)		
Consistência	Firme a dura (estado seco); branda (estado saturado)		
Diferentes horizontes do colúvio*¹	Três estratos: A - Mais superficial: 1-5m, B - Intermediário: até 12m, C - Mais profundo: até 15m		Espessura média total: 20m
Características do terraço aluvionar antigo			
Material	Blocos de rochas metavulcânicas em matriz de areia pelítica		
Espessura do terraço	15m		
Características Geológicas do substrato			
Litologia	Unidade El Pan: xistos sericíticos, cloríticos, grafiticos e quartzitos		
Foliação*²	N20E/60SE		
Faturas principais*²	Uma família: N85E/75NW		
Características das superfícies de descontinuidade	Planas, escalonadas ou rugosas; alteradas		
Espaçamento das descontinuidades	30cm		
Continuidade	5m		
Espessura rocha descomprimida*¹	20m		
Preenchimento das descontinuidades	Carbonato de cálcio		

\*<sup>1</sup> = determinado por interpretação geofísica;\*<sup>2</sup> = atitude média



## 4.2.7 LLAMACÓN

**Quadro 4-8.** Características do deslizamento Llamacón.

Zona Instável Llamacón		Localização Margem esquerda do rio Paute, 11,1km a montante da barragem.
		
Fonte: CGM		
Características físicas da principal cicatriz de escorregamento		
Coordenadas	763.800 E 9.702.950 N	
Tipo de instabilidade	Deslizamento translacional ativo que foi afetado pelo trânsito da cheia La Josefina, a qual promoveu forte erosão na base, quedas de bloco, desmoronamentos, e rastejo até hoje observados pela evolução das fendas de tração em superfície.	
Comprimento (m)	900	
Largura (m)	150 a 500	
Escarpa principal (m)	50	
Espessura média (m)	25	
Superfície (m²)	250.000	
Volume (m³)	5.600.000	
Declividade	18° na zona de acumulação; 36° na escarpa principal	
Características do colúvio		
Granulometria do material constituinte	>0,5m (5%); 0,1-0,5m (5%); < 0,1m (20%)	
Matriz	Pelito-argilosa (70%)	
Consistência	Firme a dura (estado seco); branda (estado saturado)	
Diferentes horizontes do colúvio*¹	Dois estratos: A - Mais superficial: 1-5m, B - Intermediário: até 60m	
Características do terraço aluvionar antigo		
Material	Blocos de rochas, maticos e lentes de areia oxidadas.	
Espessura do terraço*¹	15m	
Características Geológicas do substrato		
Litologia	Unidade El Pan: xistos sericíticos, cloríticos, grafíticos e quartzitos	
Foliação*²	N15E/70NW-SE	
Fraturas principais*²	Duas famílias: A) N70W/40NE B) N60E/60NW	
Características das superfícies de descontinuidade	Planas, escalonadas ou rugosas; alteradas	
Espaçamento das descontinuidades	30cm	
Continuidade	3m	
Espessura rocha descomprimida*¹	20m	

\*<sup>1</sup> = determinado por interpretação geofísica;\*<sup>2</sup> = atitude média

## 4.2.8 CHALACAY


Quadro 4-9. Características do deslizamento Chalacay.

Zona Instável Chalacay		Localização Margem direita do rio Paute, 11,3km a montante da barragem.	
			
Fonte: CGM			
Características físicas das principais cicatrizes de escorregamento			
Cicatrizes	8.1	8.2	8.3
Coordenadas	764.450E	764.450E	764.400E
	9.710.525N	9.702.700N	9.702.820N
Tipo de instabilidade	Deslizamento translacional potencialmente ativo no topo e base ativa	Deslizamento translacional potencialmente ativo no topo e base ativa	Rejeito de deslizamento translacional
Comprimento (m)	240	270	170
Largura (m)	120	150	100
Escarpa principal (m)	60	50	20
Espessura média (m)	20	20	10
Superfície (m <sup>2</sup> )	21.000	24.000	15.700
Volume (m <sup>3</sup> )	415.000	471.000	393.000
Declividade	Escarpa: 39°	Escarpa: 42°	Escarpa: 42°
	Zona de acumulação: 27°	Zona de acumulação: 31°	Zona de acumulação: 31°
Características do colúvio			
Matriz	Pelito-argiloso (70%)		
Consistência	Firme a dura (estado seco); branda (estado saturado)		
Diferentes horizontes do colúvio* <sup>1</sup>	Dois estratos: A - Mais superficial: 1-4m, B - Intermediário: até 20m		
Características Geológicas do substrato			
Litologia	El Pan: xistos sericíticos, cloríticos, grafiticos e quartzitos		
Foliação* <sup>2</sup>	N10E/60SW		
Fraturas principais* <sup>2</sup>	Uma família: N15W/60SE		
Características das superfícies de descontinuidade	Planas, escalonadas ou rugosas; alteradas		
Espessura rocha descomprimida* <sup>1</sup>	35m		
Preenchimento das descontinuidades	Carbonato de cálcio		

\*<sup>1</sup> = determinado por interpretação geofísica;\*<sup>2</sup> = atitude média

## 4.2.9 QUEBRADA HONDA

**Quadro 4-10.** Características do deslizamento de Quebrada Honda.


Zona Instável Quebrada Honda	Localização Margem esquerda da desembocadura da vertente Quebrada Honda, desaguando na margem direita do rio Paute, 12,7km a montante da barragem.
	
Fonte: CGM	
Características físicas da principal cicatriz de escorregamento	
Coordenadas	764.400E
	9.701.250N
Tipo de instabilidade	Deslizamento translacional ativo
Comprimento (m)	390
Largura (m)	350
Escarpa principal (m)	20
Espessura média (m)	20
Superfície (m <sup>2</sup> )	107.000
Volume (m <sup>3</sup> )	2.144.000
Declividade	34° na escarpa principal 24° na zona de acumulação
Características do colúvio	
Granulometria do material constituinte	Cascalhos e matacões de até 1,5m
Matriz	Argilosa (40%)
Consistência	Firme a dura (estado seco); branda (estado saturado)
Diferentes horizontes do colúvio* <sup>1</sup>	<div>Três estratos:</div> <div>A - Mais superficial: 2m,</div> <div>B - Intermediário: 6m,</div> <div>C - Mais profundo: &gt; 6m</div> <div>Espessura máxima: 20m (contato colúvio x rocha)</div>
Características Geológicas do substrato	
Litologia	Unidade El Pan (xistos sericíticos, cloríticos, grafíticos e quartzitos) e Alao-Paute (metavulcânicas meta-andesitos, quartzitos, xistos cloríticos, meta-conglomerados)
Contato das subdivisões	NNE/70NW
Foliação* <sup>2</sup>	N10E/70SE
Espessura de rocha descomprimida* <sup>1</sup>	Até 100m

\*<sup>1</sup> = determinado por interpretação geofísica;\*<sup>2</sup> = atitude média



## 4.2.10 LAS PALMAS


**Quadro 4-11.** Características do deslizamento Las Palmas.

Zona Instável Las Palmas		Localização Margem direita do rio Paute, 14km a montante da barragem.	
			
Fonte: CGM			
Características físicas da principal cicatriz de escorregamento			
Coordenadas	763.250E 9.700.000N		
Tipo de instabilidade	Deslizamento translacional ativo, com presença de inúmeras fendas de tração. Medidas de deslocamento revelaram velocidades de 2mm/dia (INECEL, 1984), que acelera em épocas inverniais (chuvas equatoriais), atingindo até 15cm/ano.		
Comprimento (m)	560		
Largura (m)	300		
Escarpa principal (m)	5		
Espessura média (m)	20		
Superfície (m²)	130.000		
Volume (m³)	2.590.000		
Declividade	45° na escarpa principal 24° na zona de acumulação		
Características do colúvio			
Granulometria do material constituinte	Cascalhos; e matações de até 3m (30%)		
Matriz	Pelito-argilosa (70%)		
Consistência	Firme a branda		
Diferentes horizontes do colúvio*¹	Dois estratos: A - Mais superficial: 1-5m, B - Intermediário: até 20m.		Espessura máxima: 20m (contato colúvio x rocha)
Ensaio triaxial (única zona instável que, por conter maior fração argilosa, permitiu talhar amostra indeformada para este ensaio)	Massa específica natural =1,55g/cm³ Coesão (c) = 0,49kg/cm² Coesão efetiva (c') = 0,51kg/cm² Ângulo de atrito (φ) = 20,3° Ângulo de atrito efetivo (φ')= 27,5°		
Características Geológicas do substrato			
Litologia	Unidade El Pan: xistos sericíticos, cloríticos, grafíticos e quartzitos		
Foliação*²	N20W/40NE		
Espessura rocha descomprimida*¹	Entre 30m (parte alta) e 70m (parte baixa).		

\*<sup>1</sup> = determinado por interpretação geofísica;\*<sup>2</sup> = atitude média

## 4.2.11 LAS JUNTAS

Quadro 4-12. Características do deslizamento Las Juntas.

Zona Instável Las Juntas		Localização Margem direita do rio Paute, 17km a montante da barragem.	
			
Fonte: CGM			
Características físicas das principais cicatrizes de escorregamento			
Cicatrizes	11.1	11.2	11.3
Coordenadas	760.640E 9.697.970N	760.780E 9.698.130N	760.850E 9.698.480N
Tipo de instabilidade	Rejeito de deslizamento translacional	Deslizamento translacional ativo	Deslizamento translacional ativo
Comprimento (m)	180	250	270
Largura (m)	100	250	150
Escarpa principal (m)	30	25	50
Espessura média (m)	20	30	20
Superfície (m²)	14.000	49.000	32.000
Volume (m³)	283.000	1.473.000	636.000
Declividade	Escarpa: 37° Zona de acumulação: 30°	Escarpa: 40° Zona de acumulação: 35°	Escarpa: 42° Zona de acumulação: 29°
Características do colúvio			
Granulometria do material constituinte	Seixos, cascalhos e matações de até 1m		
Matriz	Argilosa (50%)		
Diferentes horizontes do colúvio*¹	Dois estratos: A - Mais superficial: 5m, B - Intermediário: até 20m.		Espessura média: 20m
Características Geológicas do substrato			
Litologia	Unidade Alao-Paute: meta-andesitos, meta-conglomerados, xistos cloríticos, xistos sericíticos e quartzito		
Foliação*²	N20W/40NE		
Espacamento	15cm		




\*<sup>1</sup> = determinado por interpretação geofísica;\*<sup>2</sup> = atitude média

### 4.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS ZONAS INSTÁVEIS

As dimensões das cicatrizes são bastante elevadas, com comprimentos variando entre 170m a 900m; larguras de 80m a 500m; e espessura de colúvio de 5m a 28m. As escarpas apresentam rampas de 3m a 75m, cujos correspondentes perpendiculares ao plano prolongado do topo do colúvio têm alturas entre 1,79m e 40,85m.

De forma geral, os escorregamentos ocorridos em horizonte de rocha descomprimida e alterada (Rda) e no contato colúvio x Rda são do tipo translacional, e no próprio colúvio, acima do contato com a rocha, são circulares. Ambos apresentam características que os classificam como: ativos, potencialmente ativos ou inativos; conforme legenda do Quadro 4-13.

**Quadro 4-13.** Atividades dos escorregamentos.

Legenda	Atividade	Características
	Ativo	Cicatrizes com evidência de movimentos, como fendas de tração.
	Potencialmente ativo	Antigos escorregamentos sustentados na base por movimentos ativos.
	Inativo	Cicatrizes de escorregamento sem indícios de movimento atual.

O plano de ruptura dos movimentos circulares dentro do colúvio ocorreu a pouca profundidade, em material constituído por componente detrítico sustentado por uma matriz fino-granular, muito provavelmente no contato entre o estrato superficial (A) e o intermediário (B). Estes estratos foram interpretados pela geofísica, estando entre 3m e 5m de profundidade, conforme observado pelas profundidades das gretas de tração. Quando ocorrido em maior profundidade, o plano se deu no contato colúvio x rocha (Rda).

Os planos de ruptura translacionais ocorreram em horizonte de rocha descomprimida e alterada em profundidades que variaram de 5m a 50,85m; valores estes resultantes da soma entre as alturas das escarpas perpendiculares à superfície do corpo do colúvio e a espessura deste. Em média, tem-se um plano potencial de ruptura situado a 38,5m de profundidade em horizonte de rocha descomprimida e alterada.

As seções longitudinais da massa de material escorregado apresentam, em sua

porção mais basal, grandes volumes de rochas derivadas dos estratos rochosos que estavam situados acima do plano onde houve a ruptura. Nas porções medianas ocorre material de composição pelito-argilosa.

Pela interpretação geofísica, a espessura do estrato de rocha descomprimida e/ou alterada *in situ* varia de 20m até 100m.

Os ângulos de repouso do material das zonas de acumulação, ou corpo, referem-se aos ângulos críticos ( $i_c$ ) a partir dos quais estes colúvios estão potencialmente sujeitos a instabilizar-se novamente em horizontes acima do plano de ruptura original. Estes valores variam de 14° a 50°. No caso das escarpas, que são as feições mais ao topo das cicatrizes de escorregamento, as declividades são um pouco mais abruptas, variando a partir de 23° até 50°. Os depósitos no pé dos escorregamentos também apresentaram declividades mais elevadas com variação coincidente com a das escarpas.

Apesar dos maciços terrosos não serem o objeto mais representativo em área do local de estudo, seus atributos e respectivas classificações são expostos juntamente com o esclarecimento de alguns conceitos de mecânica dos solos. Isto se deve ao fato de que na análise da estabilidade específica das zonas de alta periculosidade, o material com maior potencial de escorregamento é o próprio colúvio já instabilizado, e não a rocha. Nas demais áreas as cicatrizes de escorregamento são pouco expressivas ou mesmo inexistentes, e nestas, dada a pouca cobertura de solo residual e ausência de depósito coluvionar, o material objeto de análise para fins de estabilidade é o horizonte de rocha descomprimida e alterada, ou Rda. A caracterização dos materiais foi feita pelo CGM e é apresentada abaixo.

## **4.4 ATRIBUTOS GEOTÉCNICOS DOS SOLOS COLUVIONARES**

### **4.4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO**

Foram coletadas amostras deformadas de solo de cada uma das zonas instáveis descritas no item anterior, exceto para as zonas Osomache Norte e Las Palmas.

Para os deslizamentos Tubán e Llamacón, em virtude de suas grandes



dimensões, foram coletadas duas amostras de cada.

Na região próxima à zona Osomache Norte, chamada La Ermita, também fez-se uma coleta de amostra deformada pela facilidade de acesso. Com isso totalizaram 12 amostras deformadas.

O propósito foi caracterizar os solos quanto à granulometria, teor de umidade ( $h$ ), Limites de Atterberg (Limite de Liquidez (LL) e de Plasticidade (LP)), conforme resume o Quadro 4-14.

**Quadro 4-14.** Ensaio de caracterização executados.

Ensaio
Análise granulométrica
Teor de umidade ( $h$ )
Limite de liquidez (LL)
Limite de plasticidade (LP)

Com base nos resultados de caracterização, enquadraram-se os solos no Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). Como este sistema foi desenvolvido inicialmente para solos de clima temperado, ressalta-se o cuidado de considerar os resultados pontualmente. Os resultados estão na Tabela 4-1.

**Tabela 4-1.** Características dos solos coluvionares e sua classificação geotécnica - SUCS.

Zona Instável	Granulometria			$h$ (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Classe SUCS
	Finos % < 0,06mm	Areia (fina a média) 0,06mm < % < 2mm	Cascalho %					
La Ermita	96,0	4,0	0	40,00	69,55	41,76	27,79	MH
Osomache	30,0	65	5	52,85	86,91	64,44	22,47	MH
S <sup>ta</sup> . Rita	65,3	15,5	19,2	16,34	31,19	23,02	8,17	ML
Tubán	52,8	16,0	31,2	13,99	50,77	31,34	19,43	MH
	51,6	28,7	19,7	6,84	38,45	25,47	12,98	ML
Osoyacu	58,3	19,9	21,8	7,90	46,85	25,32	21,53	CL
Nuñurcu	50,3	19,7	30,0	19,52	38,63	25,58	13,05	ML
Llamacón	64,4	13,8	21,8	22,00	46,59	25,17	21,42	CL
	77,6	15,7	6,7	24,35	44,64	24,40	20,24	CL
Chalacay	62,4	22,4	15,2	21,29	58,97	30,06	28,91	CH
Qda. Honda	50,1	14,4	35,5	10,87	52,21	26,05	26,16	CH
Las Juntas	50,1	29,6	20,3	21,16	40,49	19,91	20,58	CL

Fonte: CGM

Além destas informações, foram mensuradas as massas específicas natural ( $\rho_{\text{nat}}$ ) e saturada ( $\rho_{\text{sat}}$ ) das amostras, e por consequência, os pesos específicos ( $\gamma_{\text{nat}}$  e  $\gamma_{\text{sat}}$ ), mostrados mais adiante na Tabela 4-3.

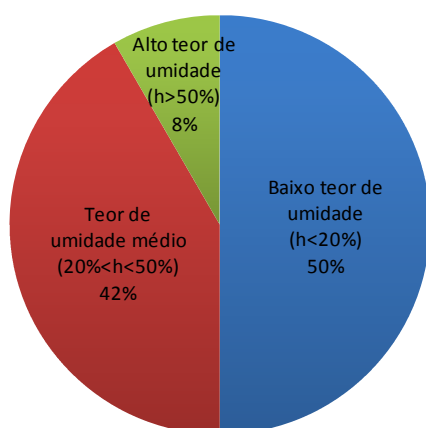
#### 4.4.1.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica revela a porcentagem dos diferentes tamanhos das partículas que compõe um solo. Nos solos analisados, observa-se que apenas uma amostra, referente à zona instável Osomache Norte, apresentou fração areia superior às demais granulometrias. As demais amostras contêm alto teor de finos, o que equivale dizer que a quantidade de grãos com tamanho inferior a 0,06mm é superior a 50%, comprovando tratar-se essencialmente de solos pelito-argilosos.

#### 4.4.1.2 Teor de umidade (h)

O teor de umidade, que é a razão entre o peso da água contida em uma massa de solo e o peso dos sólidos que a compõe, expresso em porcentagem, é bastante variável entre as amostras analisadas: de 6% a 52%. Essa variação possivelmente está associada à profundidade do nível freático na região em que se efetuou a coleta da amostra, que depende da proximidade com as vertentes da região.

Se considerarmos o teor de umidade distribuído em três classes, de acordo com



os seguintes critérios:  $h < 20\%$ ,  $h$  entre 20-50% e  $h > 50\%$ ; tem-se 8% das amostras com alto teor de umidade, 42% das amostras com teor de umidade médio e a maior parte das amostras, 50%, com baixo teor de umidade.

O Gráfico 4-1 mostra a distribuição em classes de teor de umidade.

**Gráfico 4-1.** Distribuição percentual do teor de umidade.

#### 4.4.1.3 Limite de Liquidez (LL)

O Limite de Liquidez define o teor de umidade acima do qual o solo deixa de ter comportamento plástico e passa ao estado líquido.

Os solos analisados apresentam LL bastante variável, entre 31% e 86%.

#### 4.4.1.4 Limite de Plasticidade (LP)

O Limite de Plasticidade define o teor de umidade acima do qual o solo deixa de ter comportamento semi-sólido e passa a ter comportamento plástico. O valor de LP para as amostras analisadas é bastante amplo, desde 19% até 64%.

#### 4.4.1.5 Índice de Plasticidade (IP)

A diferença entre o Limite de Liquidez (LL) e o Limite de Plasticidade (LP) resulta no Índice de Plasticidade (IP), cujo valor fornece informações acerca da amplitude da faixa da plasticidade de um solo.

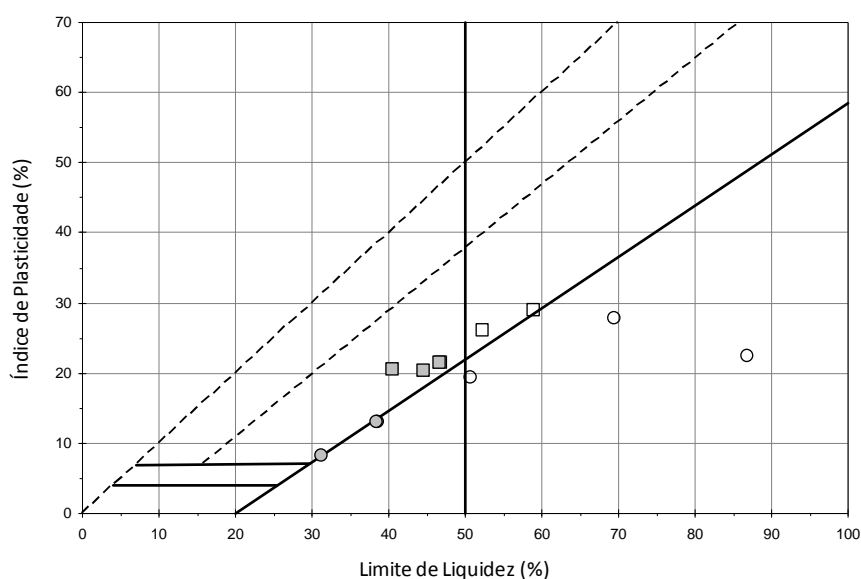
Quanto maior for o (IP), maior é a plasticidade do solo e maiores os problemas relacionados ao uso deste como material de engenharia.

O IAEG (1979) propõe uma classificação geotécnica baseada no (IP). Por esta classificação, 25% dos solos da área se enquadram no intervalo de IP entre 7 e 17, e 75% estão na faixa em que o IP varia desde 17 até 35, conforme a Tabela 4-2.

**Tabela 4-2.** Classificação geotécnica dos solos segundo Índice de Plasticidade (IAEG, 1979).

Índice de Plasticidade	% de amostras	Denominação
$7 < IP < 17$	25%	Moderadamente plástico
$17 < IP < 35$	75%	Altamente plástico
$IP > 35$	-	Extremamente plástico

Pelo índice de plasticidade (IP), que na média permanece na faixa de 20% como mostra o Gráfico 4-2, tem-se um material de comportamento altamente plástico, segundo classificação do IAEG (1979).



**Gráfico 4-2.** Gráfico do Índice de Plasticidade (IP) x Limite de Liquidez (LL) dos solos coluvionares.

Fonte: CGM

#### 4.4.1.6 Massa e peso específico ( $\rho$ e $\gamma$ ) dos solos coluvionares

O valor de massa específica dos solos coluvionares variou de  $1,58\text{g/cm}^3$  a  $2,15\text{g/cm}^3$  na condição natural ( $\rho_{\text{col\_nat}}$ ), e de  $1,74\text{g/cm}^3$  a  $2,76\text{g/cm}^3$  quando saturado ( $\rho_{\text{col\_sat}}$ ). A aceleração da gravidade no Equador é de  $9,789\text{m/s}^2$ , assim os correspondentes pesos específicos variam de  $19\text{kN/m}^3$  a  $21\text{kN/m}^3$  ( $\gamma_{\text{col\_nat}}$ ), e de  $24\text{kN/m}^3$  a  $27\text{kN/m}^3$  ( $\gamma_{\text{col\_sat}}$ ). Os resultados estão na Tabela 4-3 onde se observa valores ligeiramente menores para os solos da unidade El Pan.

**Tabela 4-3.** Valores de massa e peso específico, natural e saturada, dos solos coluvionares.

Zona Instável	Unidade litológica	massa específica natural ( $\rho_{\text{col\_nat}}$ ) $\text{g/cm}^3$	massa específica saturada ( $\rho_{\text{col\_sat}}$ ) $\text{g/cm}^3$	peso específico natural ( $\gamma_{\text{col\_nat}}$ ) $\text{kN/m}^3$	peso específico saturado ( $\gamma_{\text{col\_sat}}$ ) $\text{kN/m}^3$
Osomache Norte	Alao-Paute	1,94	2,55	19	25
Osomache	Alao-Paute	1,94	2,55	19	25
Santa Rita	Alao/El Pan	1,94	2,55	19	25
Tubán	El Pan	2,02	2,55	19,8	25
Osoyacu	El Pan	2,02	2,55	19,8	25
Ñuñurcu	El Pan	2,02	2,55	19,8	25
Llamacón	El Pan	1,94	2,76	19	27
Chalacay	El Pan	2,02	2,55	19,8	25
Quebrada Honda	Alao/El Pan	2,15	2,45	21	24
Las Palmas	El Pan	1,58	1,74	15,5	17
Las Juntas	Alao-Paute	2,15	2,45	21	24
<b>Médias por unidade litológica:</b>	<b>Alao-Paute</b>	2,01	2,52	19,67	24,67
	<b>El Pan</b>	1,94	2,45	18,95	24,00

#### 4.4.2 CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS - SUCS

Para o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), os solos são arranjados em grupos de acordo com o percentual granulométrico das frações mais finas e pela plasticidade, sendo representados pelos seguintes símbolos: M (silte), C (argila), H (alta plasticidade) e L (baixa plasticidade).

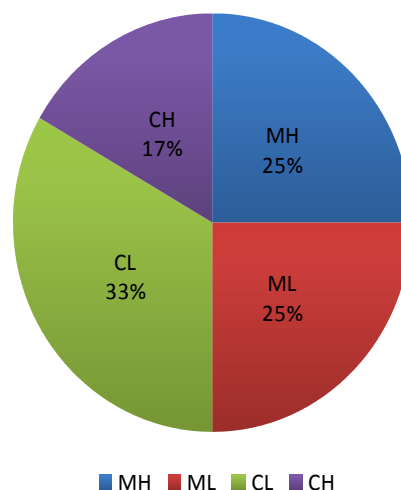
Assim, os solos dos grupos MH e ML são mais siltosos e apresentam comportamento semipermeável à permeável quando compactados, o que aumenta sua capacidade de infiltração e torna a drenagem regular a má.

Os tipos de escorregamentos mais freqüentes nestes casos são os rotacionais ou circulares, rastejos e quedas de blocos.

Os solos classificados com os símbolos CH e CL apresentam maior porcentagem de argila, tendo comportamento impermeável quando compactados, o que torna sua característica de drenagem muito ruim. O tipo de escorregamento mais comum nestes solos é o translacional ou planar.

Os resultados revelam uma distribuição de características geotécnicas dos solos de certa forma equilibrada, como observado no Gráfico 4-3.

Por este gráfico se pode observar que o solo da classe CL ocorre em 33% das zonas instáveis analisadas, seguido pelos solos das classes ML e MH (25% cada). Por fim, a classe CH representa 17% dos analisados. Se considerarmos apenas a composição granulométrica, a metade dos solos possui matriz argilosa, e a outra metade pelítica.



**Gráfico 4-3.** Ocorrência dos tipos de solo segundo sistema de classificação SUCS.

Se o atributo em evidência for o teor de plasticidade, representado pelas letras H e L, então, pelo mesmo gráfico, observa-se que 58% dos solos são classificados como pouco plásticos, e um percentual um pouco menor, de 42%, mais plásticos.

Em virtude da baixa representatividade de amostras de solo caracterizadas em relação à área de estudo, estas comparações percentuais valem para o universo amostrado e qualquer extrapolação interpretativa deve ser criteriosa.

A correlação entre a classificação SUCS e as propriedades geotécnicas dos solos coluvionares pode ser vista no Quadro 4-15.

**Quadro 4-15.** Propriedades geotécnicas de solos segundo Classificação SUCS.

Propriedades Geotécnicas	Classificação SUCS			
	MH	ML	CH	CL
Classificação dos solos	Silte elástico	Silte	Argila muito plástica	Argila pouco plástica
Trabalhabilidade como material de construção	Má	Regular	Má	Regular a boa
Permeabilidade quando compactado	Semipermeável à permeável		Impermeável	
Resistência compactada e saturada	Baixa a regular	Regular	Baixa	Regular
Compressibilidade compactada e saturada	Alta	Média	Alta	Média
Peso específico máximo (kN/m <sup>3</sup> )	11 a 15	15 a 19	12 a 17	15 a 19
Valor como fundação	Má	Muito má	Regular a má	Má a boa
Características de drenagem	Regular a má		Má	

Fonte: ABGE (1998)

#### 4.4.3 PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DO SOLO COLUVIONAR

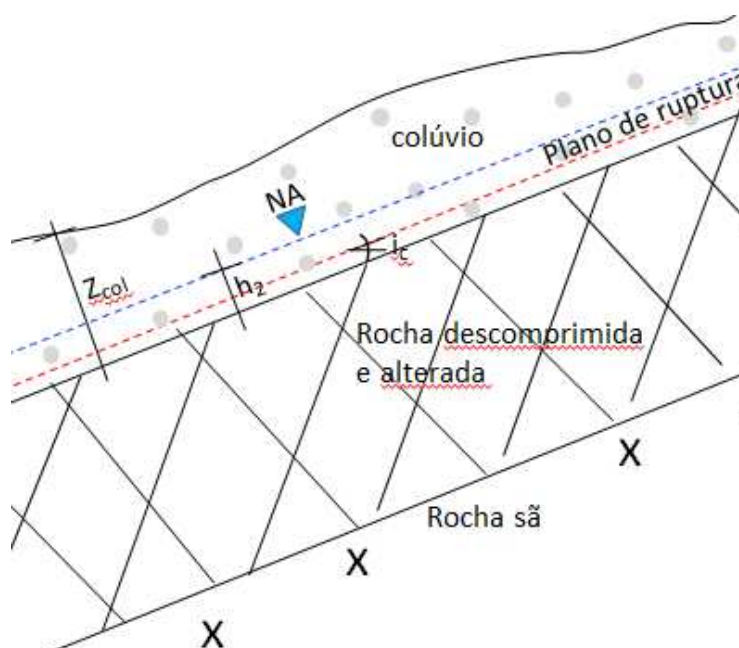
Considerando que os solos coluvionares suscetíveis a instabilizar-se têm um componente detrítico suportado por uma matriz fino-granular, tornou-se difícil obter amostras indeformadas para a realização de ensaios. Apenas na região de Las Palmas foi possível coletar amostra indeformada e aplicar método direto através do ensaio triaxial CU, o qual foi importante para aferir os valores deduzidos por retroanálise.

##### 4.4.3.1 Ângulo de atrito de solos coluvionares por retroanálise

O ângulo de atrito interno ( $\phi$ ) dos solos coluvionares, para fins deste estudo, foi determinado por retroanálise. Considerou-se que no exato momento de uma ruptura translacional em meio a este material a coesão era nula e o Fator de Segurança igual a 1,05 (em função da aceleração sísmica de baixo grau que deu origem aos movimentos da área de estudo). O plano de ruptura estaria completamente envolto pela matriz coluvionar, ou

seja, acima do contato solo x rocha, e a declividade da encosta corresponderia ao ângulo crítico ( $i_c$ ), o qual vem a ser a menor inclinação a partir da qual uma vertente sai de seu estado inercial. Além destes atributos, considerou-se o grau de saturação do solo através da variável ( $m$ ), que é a razão entre a altura do nível freático ( $h_2$ ) e a espessura total do colúvio ( $Z_{col}$ ), como expressa a Eq. 4-1. As variáveis  $i_c$ ,  $h_2$  e  $Z_{col}$  podem ser vistas na Figura 4-4.

$$\text{Eq. 4-1} \quad m = \frac{h_2}{Z_{col}}$$



**Figura 4-4.** Ângulo crítico de inclinação e parâmetros que definem a variável  $m$  no colúvio  $= h_2/Z_{col}$ .

Por desconhecimento da real profundidade do nível d'água durante o evento que desencadeou a instabilidade das áreas escorregadas, simularam-se três alturas de NA, representado pela variável ( $h_2$ ) e, por consequência, três percentuais de saturação ( $m$ ), os quais constam na Tabela 4-4.

**Tabela 4-4.** Percentuais de saturação considerados para análise.

Espessura do colúvio	Altura do nível freático no colúvio ( $h_2$ )	$m$
$Z_{col}$	$0,1 Z_{col}$	10%
$Z_{col}$	$0,5 Z_{col}$	50%
$Z_{col}$	$1 Z_{col}$	100%



Sob estas considerações, aplicou-se a Eq. 4-2 abaixo para determinar o ângulo de atrito:

$$\text{Eq. 4-2} \quad tg\phi_{col} = \frac{tg i_c * \gamma_{col}}{1,05 * (\gamma_{col} - m\gamma_a)}$$

Onde:

$\phi_{col}$  = ângulo de atrito interno do solo coluvionar;  
 $i_c$  = ângulo crítico;  
 $\gamma_{col}$  = peso específico do solo coluvionar (natural ou saturado);  
 $m$  = percentual de colúvio saturado;  
 $\gamma_a$  = peso específico da água.

A massa específica da água a uma temperatura de 20°C é considerada igual a 1g/cm<sup>3</sup>, e seu peso específico ( $\gamma_a$ ) equivale a 10kN/m<sup>3</sup>.

Para os casos em que a presença de água foi de 100%, o peso específico utilizado no cálculo foi o de solo coluvionar saturado ( $\gamma_{col\_sat}$ ). Nos casos com saturação igual a 10%, usou-se a variável de peso específico natural ( $\gamma_{col\_nat}$ ). Para saturação de 50%, fez-se a média dos anteriores ( $\gamma_{col\_med}$ ).

Os resultados de ângulo de atrito retroanalizados ( $\phi_{col}$ ) pelo Método de Hoek-Brown e os correspondentes graus de saturação simulados (m) estão na Tabela 4-5.

**Tabela 4-5.** Valores de ângulo de atrito interno do colúvio retroanalizados.

			Graus de saturação:		
			m=0,1	m=0,5	m=1
Zona Instável	Unidade litológica	Ângulo crítico (i <sub>c</sub> ) = inclinação média do colúvio	Ângulo de atrito interno retroanalizado $\phi(^{\circ})$		
Osomache Norte	Alao-Paute	33	33	39	46
Osomache	Alao-Paute	33	33	39	46
Santa Rita	Alao/El Pan	27	27	32	39
Tubán	El Pan	16	16	19	24
Osoyacu	El Pan	14	14	17	22
Nuñurcu	El Pan	23	23	27	34
Llamacón	El Pan	18	18	22	26
Chalacay	El Pan	31	31	36	44
Quebrada Honda	Alao/El Pan	24	24	29	36
Las Palmas	El Pan	24	24	31	46
Las Juntas	Alao-Paute	31	31	36	44
Médias por unidade litológica:	Alao-Paute	32,33	32,33	38	45,33
	El Pan	21	21	25,33	32,66
Média geral		24,9	24,9	29,72	37

Conforme a Tabela 4-5, quanto maior o valor de  $m$  maior o ângulo de atrito ( $\phi$ ). Isso ocorre como compensação pois como o Fator de Segurança adotado na retroanálise é o mesmo para todos os casos de saturação estudados, o ângulo de atrito aumenta para atender ao valor de FS definido e cresce a necessidade de água no sistema para promover a instabilidade.

Ainda na tabela acima, nota-se que o ângulo de atrito para um grau de saturação do colúvio de 10% equivale ao ângulo crítico de inclinação da encosta. Isto era de se esperar, considerando a teoria do equilíbrio-limite atrelado a uma condicionante sísmica.

A unidade litológica Alao-Paute apresentou valores maiores de ( $\phi$ ) que El Pan, fato associado à inclinação dos depósitos coluvionares, adotada como ângulo crítico.

Como média geral, sem distinção de unidade litológica, o ( $\phi$ ) variou desde 24,90°, para  $m = 0,1$ ; até 37°, para  $m = 1$ .

#### 4.4.3.2 Ensaio triaxial

Os resultados dos parâmetros ( $c$ ) e ( $\phi$ ) determinados por meio de ensaio triaxial para a amostra de solo coluvionar do deslizamento Las Palmas estão na Tabela 4-6.

**Tabela 4-6.** Parâmetros geotécnicos de colúvio obtidos por ensaio triaxial.

Massa específica natural ( $\rho_{nat}$ )	Coesão ( $c$ )	Coesão efetiva ( $c'$ )	Ângulo de atrito interno ( $\phi$ )	Ângulo de atrito interno efetivo ( $\phi'$ )
1,55g/cm <sup>3</sup>	49kPa	51kPa	20,3°	27,5°

Resumidamente, a Tabela 4-7 expressa a variação dos valores de ( $\phi$ ) retroanalizados e os resultados do ensaio triaxial.

**Tabela 4-7.** Comparação entre valores retroanalizados e reais de  $c$  e  $\phi$  para colúvio.

Método	coesão (kPa)	ângulo de atrito interno (°)
retroanálise	0	24,9 – 37
ensaio triaxial	49 - 51	20,3 – 27,5

Comparando o ângulo de atrito interno resultante do método direto com a os valores determinados por retroanálise para Las Palmas (Tabela 4-5), observa-se que a presença de coesão, para o caso real, está associada a um ângulo de atrito menor.

## 4.5 ATRIBUTOS GEOTÉCNICOS DOS MACIÇOS ROCHOSOS

### 4.5.1 CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA

Para fins de classificação geomecânica, segundo sistema RMR proposto por Bieniawski (1973), além das características do maciço, é necessário avaliar os parâmetros de resistência à compressão simples da rocha intacta, obtidos através de ensaios de carga pontual e de resistência dos maciços, apresentados resumidamente a seguir.

Através de ensaios laboratoriais executados por CGM, se determinaram os pesos e massas específicas de amostras das rochas de cada zona instável. Além disso, pelas descrições visuais dos afloramentos apresentadas nos quadros-resumo, determinou-se as características das discontinuidades.

#### 4.5.1.1 Massa e peso específico ( $\rho$ e $\gamma$ ) das rochas descomprimidas e alteradas

A massa e o peso específico das rochas descomprimidas e alteradas estão na Tabela 4-8 onde se observa valores ligeiramente menores para a unidade Alao-Paute.

**Tabela 4-8.** Valores de massa e peso específico, natural e saturada, das rochas descomprimidas e alteradas.

Zona Instável	Unidade litológica	massa específica natural ( $\rho_{nat}$ ) g/cm <sup>3</sup>	massa específica saturada ( $\rho_{sat}$ ) g/cm <sup>3</sup>	peso específico natural ( $\gamma_{nat}$ ) kN/m <sup>3</sup>	peso específico saturado ( $\gamma_{sat}$ ) kN/m <sup>3</sup>
Osomache Norte	Alao-Paute	2,66	2,96	26	29
Osomache	Alao-Paute	2,66	2,96	26	29
Santa Rita	Alao e El	2,66	2,96	26	29
Tubán	El Pan	2,45	2,76	24	27
Osoyacu	El Pan	2,45	2,76	24	27
Nuñurcu	El Pan	2,45	2,76	24	27
Llmacón	El Pan	2,66	2,96	26	29
Chalacay	El Pan	2,45	2,76	24	27
Quebrada Honda	Alao e El	2,45	2,76	24	27
Las Palmas	El Pan	2,15	2,45	21	24
Las Juntas	Alao-Paute	2,66	2,96	26	29
<b>Médias por unidade litológica:</b>	<b>Alao-Paute</b>	2,45	2,76	24	27
	<b>El Pan</b>	2,59	2,89	25,33	28,33

O valor de peso específico natural variou para as rochas descomprimidas e alteradas de 21kN/m<sup>3</sup> até 26kN/m<sup>3</sup>, e na condição saturada entre 24kN/m<sup>3</sup> e 29kN/m<sup>3</sup>, considerando a aceleração da gravidade no Equador igual a 9,789m/s<sup>2</sup>.

#### 4.5.1.2 Características das discontinuidades

As discontinuidades observadas nos maciços rochosos aflorantes, referentes à zona de rocha descomprimida e alterada nos locais das zonas instáveis, em sua maior parte são foliações, seguidas de fraturas. Suas características são:

- grau de alteração: A4 (elevado, segundo ABGE, 1998);
- espaçamento ( $E_d$ ): entre 16cm e 50cm (classes E3 e E4 – próximas a medianamente afastadas, segundo ABGE, 1998);
- persistência: entre 3m e 5m (pequena a média, segundo ISRM, 1978).

As superfícies das discontinuidades apresentam-se em condições variadas, mas em sua maioria são levemente rugosas, com aberturas de 1mm e preenchidas com carbonato de cálcio.

Quanto aos mergulhos, estes têm ângulo elevado, variando de 35° a 70°. Quando aparentes, variam desde 25° a 60° (ver Tabela 4-11).

#### 4.5.1.3 Índice de compressão pontiforme ( $I_s$ ) e resistência à compressão simples

Foram realizados pelo CGM ensaios de carga pontual em amostras de xistos intactos da região e os índices de carga ( $I_s$ ) variaram desde 1,64MPa até 14,46MPa, com valor médio de 6MPa.

Os resultados encontram-se na Tabela 4-9.

**Tabela 4-9.** Resultados de ensaio de carga pontual para amostras de rocha intacta.

Amostra	Índice de carga pontual ( $I_s$ ) MPa	Resistência à compressão simples ( $q_u$ ) MPa
1	1,64	35,48
2	14,46	319,12
3	5,55	120,75
4	3,09	65,29
5	4,95	106,96
6	3,22	69,74
7	2,34	50,90
8	5,60	124,80
9	12,14	273,89
<b>Média:</b>	<b>6</b>	<b>130</b>

Se levarmos em consideração a relação definida por Johnson e Degraff (1994) de que a compressão simples da rocha intacta ( $q_u$ ) corresponde a 24 vezes o valor da carga pontual, então na média este valor seria 144MPa, o que se aproxima da média real que foi de 130MPa, com mínimo de 35,48MPa e máximo de 319,12MPa. Pela classificação de Franklin e Dusseault (1989) esta rocha é considerada dura.

#### 4.5.1.4 RQD

O valor de RQD médio para o maciço rochoso de rocha descomprimida e alterada foi de 80%, que é um valor que está no limite entre as classes de rocha de boa qualidade, segundo Barton *et al.* (1974).

#### 4.5.1.5 Classe RMR

Se adotarmos os valores médios das características citadas, o maciço de rocha descomprimida e alterada da área de estudo, para fins de análise de estabilidade de encosta, se enquadraria na classe III do sistema RMR, considerada regular, com um somatório de pesos finais de 49. Nesta classe, os valores dos parâmetros de resistência estimados são: coesão entre 200kPa e 300kPa, e ângulo de atrito interno entre 25° e 35°.

Correlacionando o resultado de RMR com o Sistema Q, têm-se valores variando entre 1,74 e 0,85, o que enquadra os maciços rochosos da região entre as categorias Ruim a Muito Ruim, segundo proposto por Barton.

### 4.5.2 PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DA ROCHA DESCOMPRIMIDA E ALTERADA - RDA

Os atributos de resistência ( $c$ ) e ( $\phi$ ) para as rochas descomprimidas e alteradas (Rda) foram determinados por meio direto através de ensaios de cisalhamento realizados pelo CGM. Além disso, fez-se uma tentativa de determinar estes parâmetros por retroanálise pelo mesmo método empregado para solos. Esta proposta pode parecer ousada

considerando que o método de Hoek-Brown é usualmente empregado para horizontes de solo. A tentativa vale como comparação e fornecimento de dados que talvez contribuam com a evolução de outros estudos indiretos *a posteriori*.

#### 4.5.2.1 Ensaio de cisalhamento direto

O Consórcio Gerência Mazar (CGM) realizou ensaios de cisalhamento direto em amostras de rochas metamórficas alteradas de Santa Rita, Osoyacu, Chalacay, Quebrada Honda, Las Palmas e Las Juntas, e os resultados de coesão foram bastante variados, desde 35kPa até 250kPa, em função do grau de alteração, como pode ser visto na Tabela 4-10.

Com respeito ao ângulo de atrito, este foi, em média, próximo a 34°, com mínimo de 30° e máximo de 37°. Se comparados estes valores com os estimados pela classificação RMR, o ângulo de atrito se enquadraria perfeitamente, e a coesão, na maior parte, também, exceto para as zonas Quebrada Honda, Las Palmas e Las Juntas. Nestes locais, os resultados de coesão foram muito aquém do proposto pela Classificação RMR e isto se deve ao grau de alteração das rochas aflorantes. Em termos de unidade litológica, El Pan apresenta coesão e ângulo de atrito interno médios iguais a 106kPa e 32,8°, inferiores aos da unidade Alao-Paute, mensurados em 178kPa e 36,3° respectivamente.

Para fins de estudo, as demais áreas não amostradas tiveram os valores de  $c$  e  $\phi$  extrapolados das regiões mais próximas amostradas.

**Tabela 4-10.** Valores de resistência à compressão simples de rocha ( $R_d$ ) por cisalhamento direto.

Zona Instável	Unidade litológica	Coesão real ( $c$ ) (kPa)	Ângulo de atrito real $\phi$ (°)
Osomache Norte <sup>*3</sup>	Alao-Paute	250	36
Osomache <sup>*3</sup>	Alao-Paute	250	36
Santa Rita	Alao e El	250	36
Tubán <sup>*3</sup>	El Pan	100	30
Osoyacu	El Pan	100	30
Ñuñurcu <sup>*3</sup>	El Pan	100	33
Llamacón <sup>*3</sup>	El Pan	200	36
Chalacay	El Pan	100	33
Quebrada Honda	Alao e El	35	34
Las Palmas	El Pan	40	35
Las Juntas	Alao-Paute	35	37
<b>Médias por unidade litológica:</b>	<b>Alao-Paute</b>	<b>178</b>	<b>36,3</b>
	<b>El Pan</b>	<b>106</b>	<b>32,8</b>

<sup>\*3</sup> = valores extrapolados da zona instável mais próxima.

Fonte: CGM



## 4.5.2.2 Ângulo de atrito de rocha descomprimida e alterada por retroanálise

O horizonte de rocha descomprimida e alterada é entrecortado por descontinuidades e de forma alguma se enquadra no critério de maciço homogêneo. No entanto, para fins de estudos, ousou-se aplicar o mesmo método de determinação de ângulo de atrito por retroanálise empregado nos solos coluvionares, considerando coesão nula no exato momento da ruptura, e Fator de Segurança levemente superior à unidade em função da inclusão de aceleração sísmica ( $FS = 1,05$ ).

Quanto ao ângulo crítico ( $i_c$ ), diferente dos solos, nos horizontes rochosos este valor não corresponde à declividade das encostas em si, mas aos mergulhos aparentes das descontinuidades mais marcantes em relação à direção da encosta, sendo por vezes as foliações ou fraturas. No caso da direção da encosta ser concordante com a direção do plano de fraqueza, o mergulho real desta coincidirá com o ângulo crítico.

O cálculo para determinar o mergulho aparente levou em consideração a direção da encosta para cada zona de instabilidade e a atitude das descontinuidades mais marcantes. Numa sucessão de análise do mergulho aparente em relação à direção da encosta, avaliou-se cada uma das descontinuidades medidas para determinar qual a mais favorável para comportar-se como plano preferencial de escorregamento. Os valores analisados encontram-se discriminados nos quadros-resumos (Quadro 4-2 a Quadro 4-12).

No exemplo apresentado no Quadro 4-16, observa-se que a foliação não é o fator determinante de escorregamento porque seu mergulho é oposto à direção do terreno. A fratura, no entanto, mergulha concordante à face livre da encosta, com ângulo de  $37,5^\circ$ . Considerando que a declividade da encosta é a média da zona homóloga, as fraturas tornam-se planos favoráveis à instabilidade nas porções em que o terreno for igual ou menor que seu mergulho aparente.

**Quadro 4-16.** Exemplo de cálculo de mergulho aparente de descontinuidade em relação à encosta.

<b>Exemplo: Osomache Norte – Atitude da encosta: N10E/33SW</b>		
Descontinuidades medidas:	N70E/60SE (foliação)	N40W/50SW (fratura)
Mergulho real da descontinuidade	$60^\circ$	$50^\circ$
Menor ângulo entre direção da encosta e plano da descontinuidade	$60^\circ$	$50^\circ$
Mergulho aparente	$40,9^\circ$	$37,5^\circ$

Os valores de mergulho aparente, a direção das encostas e a descontinuidade mais favorável à instabilidade de cada zona estudada encontram-se na Tabela 4-11.

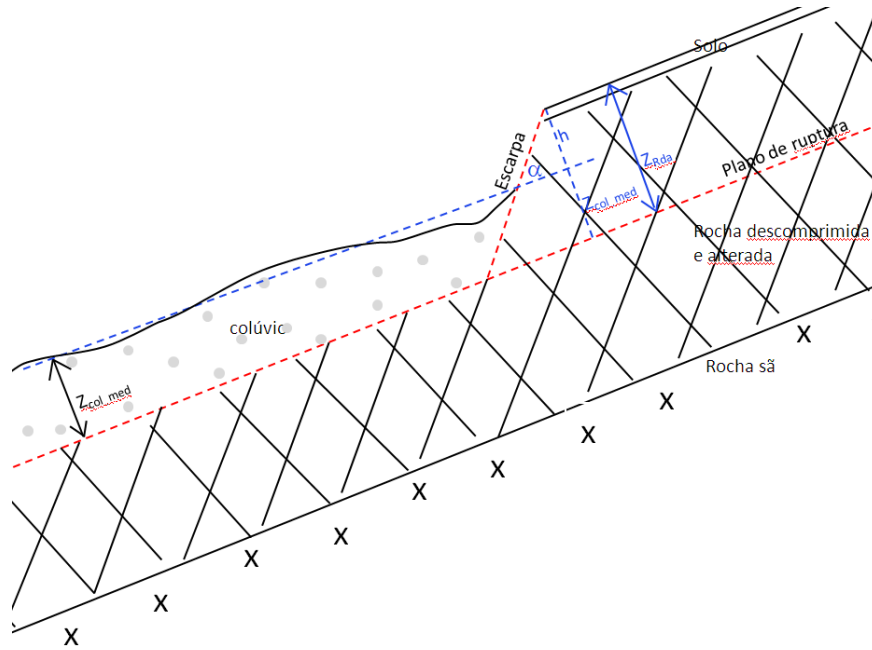
**Tabela 4-11.** Mergulho aparente das descontinuidades mais favoráveis à instabilidade.

Zona Instável	Unidade litológica	Direção da encosta	Inclinação média da encosta (°)	Descontinuidade condicionante da ruptura e atitude		Ângulo crítico ( $i_c$ ) = mergulho aparente da descontinuidade (°)
Osomache Norte	Alao-Paute	N10E	33	Fratura	N40W/50SW	37,5
Osomache	Alao-Paute	N10W	33	Fratura	N30E/35SE	28,2
Santa Rita	Alao e El	N10W	27	Foliação	N20E/70SE	25,5
Tubán	El Pan	N60W	16	Foliação	N20E/70NW	25,5
Osoyacu	El Pan	N25E	14	Fratura	N30W/60SW	44,8
Nuñurcu	El Pan	N20E	23	Foliação	N20E/60SE	36,2
Llmacón	El Pan	N10W	18	Fratura	N70W/40NE	25,7
Chalacay	El Pan	N60W	31	Foliação	N10E/60SW	30,6
Quebrada Honda	Alao e El	N50E	24	Contato litológico	NS/70NW	60,5
Las Palmas	El Pan	N35E	24	Foliação	N20W/40NE	25,7
Las Juntas	Alao-Paute	N35E	31	Foliação	N20W/40NE	25,7

Nas análises efetuadas, a principal condicionante de instabilidade em horizonte de rocha descomprimida e alterada na região é a foliação, quando o mergulho desta for no sentido da face livre das encostas. Caso contrário, são as famílias de fraturas mais expressivas que determinam o plano preferencial de instabilidade. No caso da zona instável denominada Quebrada Honda, o plano de fraqueza mais propício a um evento de instabilidade é condicionado pelo contato entre as unidades litológicas Alao-Paute e El Pan, que ocorre justo em sua área.

Os mergulhos aparentes em relação às frentes das encostas em geral são maiores que as mesmas, exceto para: Osomache, Santa Rita e Chalacay, que neste caso, estariam mais suscetíveis a mobilizar-se, segundo critérios estruturais.

O plano de ruptura em rocha descomprimida e alterada de cada zona instável, que ocorre a uma profundidade  $Z_{Rda}$ , conforme demonstrado na Figura 4-5, foi calculada somando a espessura média do colúvio ( $Z_{col\_med}$ ), deduzida por geofísica, com a cobertura de rocha acima desta, representado nesta figura pela letra (h). Esta variável é calculada conhecendo-se o comprimento da escarpa e deduzindo-se o ângulo de inclinação da mesma ( $\alpha$ ). Por relação trigonométrica, estima-se (h) e, conseqüentemente, tem-se  $Z_{Rda}$ .



**Figura 4-5.** Profundidade do plano de ruptura em horizonte de rocha ( $Z_{Rda}$ ).

Com respeito ao grau de saturação do horizonte Rda, expresso pela variável ( $m$ ) da Eq. 4-3, foram simuladas as mesmas alturas do nível freático em meio à rocha ( $h_2$ ) utilizadas para análise dos colúvios, ou seja:  $m = 10\%$ ,  $m = 50\%$  e  $m = 100\%$ . Estas variáveis foram inseridas na Eq. 4-4 para determinar o ângulo de atrito ( $\phi$ ) da rocha descomprimida e alterada por retroanálise.

**Eq. 4-3**

$$m = \frac{h_2}{Z_{Rda}}$$

Onde:

$m$  = percentual de saturação no horizonte de Rda;  
 $h_2$  = altura do nível freático;  
 $Z_{Rda}$  = altura total do horizonte de rocha descomprimida e alterada.

**Eq. 4-4**

$$\tan \phi_{Rda} = \frac{\tan i_c * \gamma_{Rda}}{1,05 * (\gamma_{Rda} - m \gamma_a)}$$

Onde:

$\phi_{Rda}$  = ângulo de atrito interno do rocha descomprimida e alterada;  
 $i_c$  = ângulo crítico = mergulho real ou aparente das discontinuidades;  
 $\gamma_{Rda}$  = peso específico da rocha descomprimida e alterada;  
 $m$  = percentual de Rda saturada;  
 $\gamma_a$  = peso específico da água.

Dependendo do valor do grau de saturação simulado, definiu-se o peso específico a ser utilizado na fórmula. Para um grau de saturação igual a 10% utilizou-se o peso específico natural ( $\gamma_{Rda\_nat}$ ). Nas situações de saturação igual a 100%, o peso específico utilizado foi o saturado ( $\gamma_{Rda\_sat}$ ). Para grau de saturação de 50% utilizou-se a média do peso natural e saturado ( $\gamma_{Rda\_med}$ ).

Os resultados de ângulo de atrito retroanalizado estão na Tabela 4-12.

**Tabela 4-12.** Valores de ângulo de atrito interno retroanalizados para rocha descomprimida e alterada.

			Graus de saturação:		
			m=0,1	m=0,5	m=1
Zona Instável	Unidade litológica	Ângulo crítico (ic) = mergulho aparente da descontinuidade mais crítica em rocha	Ângulo de atrito interno retroanalizado ϕ(°)		
Osomache Norte	Alao-Paute	37,5	37,2	41,8	48,1
Osomache	Alao-Paute	28,2	28,0	32,0	37,9
Santa Rita	Alao/El Pan	25,5	25,3	29,0	34,7
Tubán	El Pan	25,5	25,4	29,5	35,8
Osoyacu	El Pan	44,8	44,6	49,6	56,3
Ñuñurcu	El Pan	36,2	36,0	40,9	47,9
Llamacón	El Pan	25,7	25,5	29,3	35,0
Chalacay	El Pan	30,6	30,4	35,0	41,8
Quebrada Honda	Alao/El Pan	60,5	60,3	64,5	69,5
Las Palmas	El Pan	25,7	25,7	30,5	38,2
Las Juntas	Alao-Paute	25,7	25,6	29,7	36,1
Médias por unidade litológica:	Alao-Paute	30,46	30,26	34,5	40,7
	El Pan	31,41	31,26	35,8	42,5
Média geral		33,26	33,09	37,43	43,75

Conforme a Tabela 4-12Tabela 4-5, novamente observa-se que quanto maior o valor de m maior o ângulo de atrito ( $\phi$ ) retroanalizado. Isso ocorre como compensação, pois como o Fator de Segurança adotado na retroanálise é o mesmo para todos os casos de saturação estudados, o ângulo de atrito aumenta para atender ao valor de FS definido e maior é a necessidade de saturação no sistema para que a instabilidade se instale.

Ainda na tabela acima, nota-se que o ângulo de atrito para um grau de saturação do colúvio de 10% aproxima-se do ângulo crítico de inclinação da encosta.

A unidade litológica Alao-Paute apresentou valores de ( $\phi$ ) menores que as de El Pan, fato indicativo de que os mergulhos aparentes das descontinuidades daquela unidade são menores que as da unidade El Pan. Como média geral, sem distinção de unidade litológica, o ( $\phi$ ) variou desde 33,09°, para m = 0,1; até 43,75°, para m = 1.

Comparando os valores de  $\phi$  retroanalizados apresentados na Tabela 4-12, com os reais apresentados na Tabela 4-10, há uma semelhança em ordem de grandeza. No entanto, considerando que a coesão para fins de retroanálise é zero, e nos casos reais ela supera 35kPa, chegando a 250kPa, então os valores retroanalizados estariam subestimados.

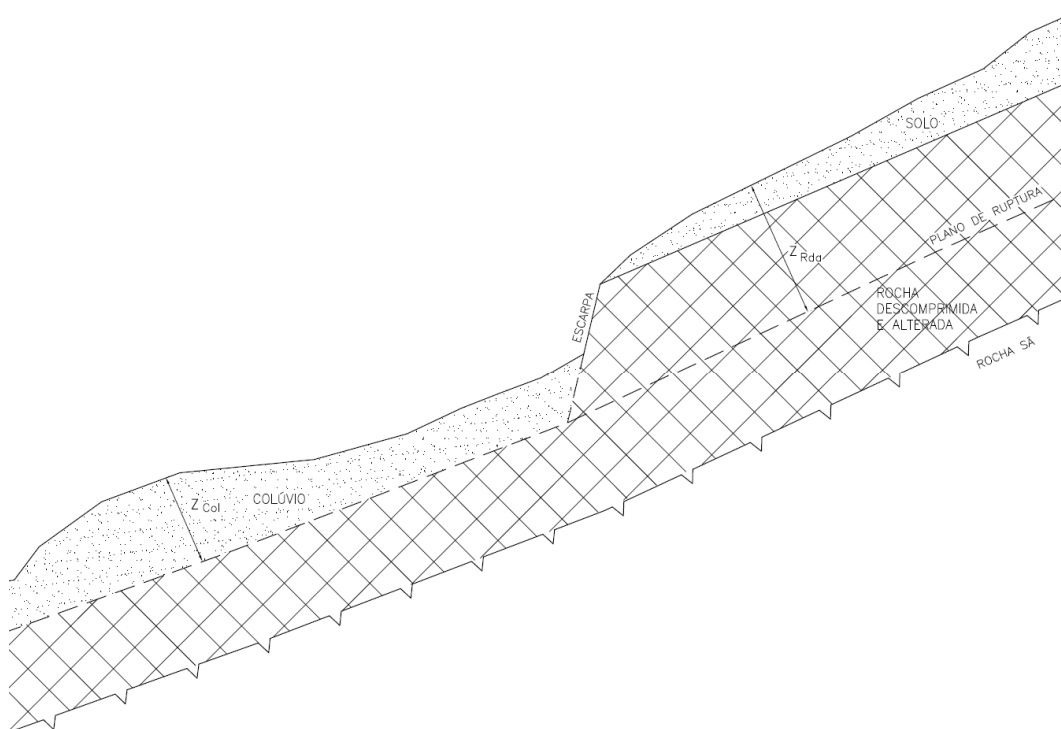
Para fins de análise de estabilidade do maciço rochoso, vale-se dos valores retroanalizados por questões de conservadorismo.

# ANÁLISE DA ESTABILIDADE DAS ENCOSTAS

Se considerarmos as encostas em sua forma primitiva na região de estudos, estas eram compostas por uma capa de solo residual praticamente insignificante, inferior a 2m de espessura, sobre rocha descomprimida e alterada (Rda). Portanto, os escorregamentos que deram origem às grandes massas instabilizadas ocorreram ao longo de descontinuidades presentes neste material identificado como Rda, preferencialmente ao longo de foliações, como já visto. A análise de estabilidade para este contexto morfológico considerou os parâmetros de resistência determinados por retroanálise e em laboratório; e os mergulhos aparentes das descontinuidades mais críticos em relação às encostas. A profundidade do plano de ruptura resultou da distância perpendicular do topo da escarpa em relação ao plano da superfície do corpo do colúvio somada à altura deste. Esta variável está representada na Figura 5-1 como  $Z_{Rda}$ .

Para as zonas já instabilizadas, com cobertura de solo coluvionar significativa, considerou-se o plano limite de um possível novo evento de instabilidade como sendo um horizonte no colúvio, em ângulo concordante com a declividade do terreno. Assim, os parâmetros de resistência utilizados para determinação de Fator de Segurança destas regiões foram os ângulos de atrito interno e coesões referentes ao solo coluvionar, definido por retroanálise e em laboratório. As espessuras destas camadas foi comparada igual à altura desses depósitos ( $Z_{col}$ ), como mostra a Figura 5-1.





**Figura 5-1.** Planos de ruptura considerados para cálculo de Fator de Segurança ( $Z_{col}$  e  $Z_{Rda}$ ).

Para a condição dinâmica ou pseudo-estática, adotou-se o coeficiente sísmico horizontal ( $K_h$ ) de projeto estimado em 0,14g para um sismo de magnitude 7,5, obtido mediante a curva desenvolvida por Pyke (1999) apresentada no Capítulo 3, resultante de um PGA de 0,28g.

Ainda na condição pseudo-estática, fez-se outra análise de estabilidade superestimando o coeficiente de aceleração sísmica ( $K_h$ ) ao dobro do projeto, ou seja, 0,28g. Este exagero tem o intuito de visualizar com maior clareza a interferência da aceleração sísmica nos valores de Fator de Segurança e, por consequência, na estabilidade das encostas. Tal situação, ainda que hipotética, poderia acontecer não somente se a magnitude do evento sísmico superasse 7,5, mas também no caso da distância do epicentro ser menor do que o considerado na análise de risco sísmico realizado para o Projeto Mazar, ou seja, inferior a 80km. Para todos os casos, o peso específico da água ( $\gamma_a$ ) utilizado nos cálculos foi de 10kN/m<sup>3</sup>.

Além das condições sísmicas, as análises se realizaram para três condições de saturação da encosta, conforme indicado no Quadro 5-1.

**Quadro 5-1.** Condições de avaliação do Fator de Segurança.

Grau de saturação da encosta (m)	Condição sísmica		
	Estática	Pseudo-estática	
10%	Sem sismo	Com sismo de projeto ( $K_h = 0,14g$ )	Com sismo superestimado ( $K_h = 0,28g$ )
50%			
100%			

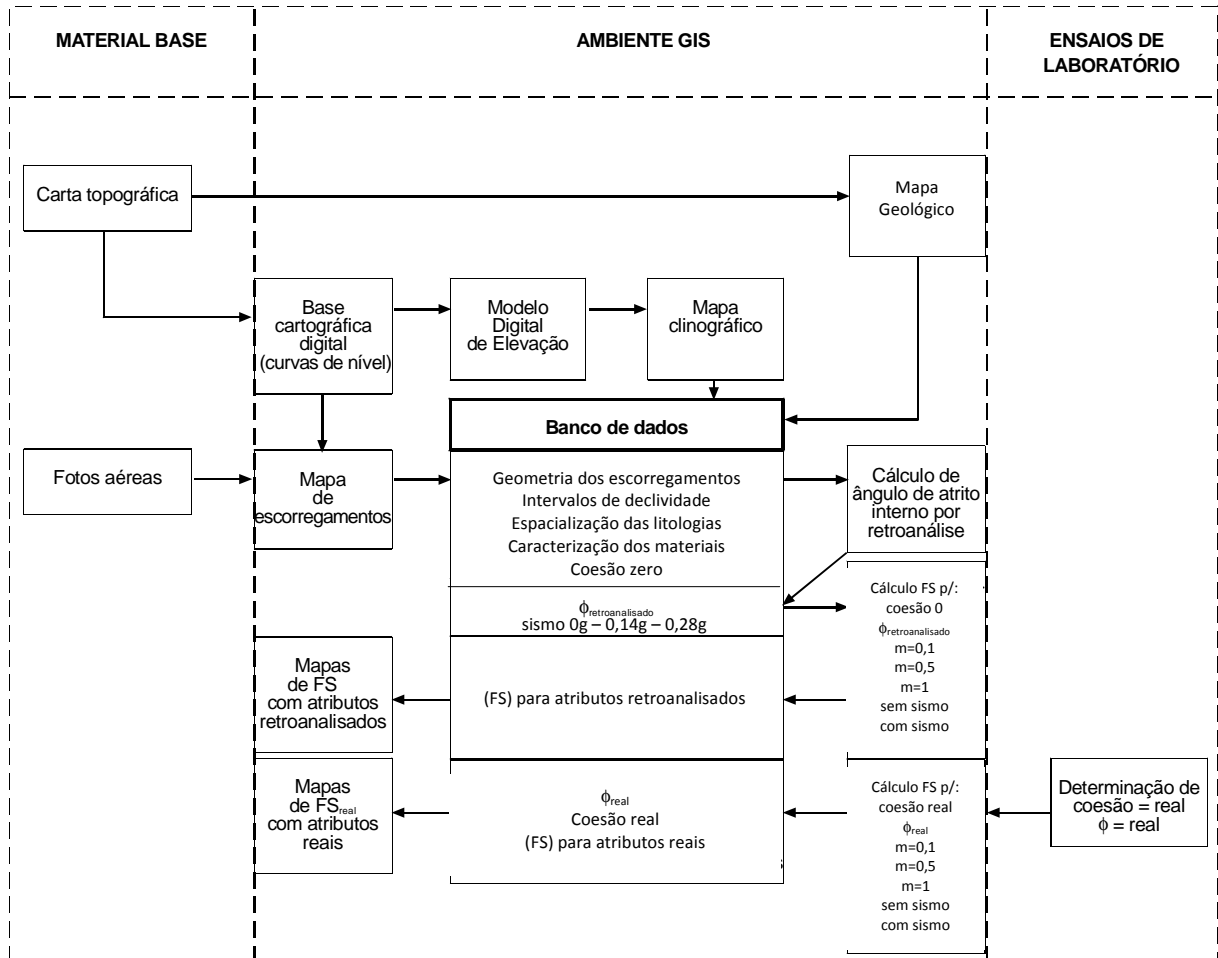
Inicialmente, os cálculos foram efetuados para doze situações consideradas para as zonas instáveis descritas no Capítulo 4, segundo critérios resumidos no Quadro 5-2.

**Quadro 5-2.** Critérios analisados para cálculo de Fator de Segurança.

Análise	Critérios analisados para determinação do Fator de Segurança				
	Condição sísmica		coesão	$\phi$	m
1	Sem sismo	0	0	retroanalizado	0,1
2		0			0,5
3		0			1,0
4	Sismo de projeto	0,14g			0,1
5		0,14g			0,5
6		0,14g			1,0
7	Sismo superestimado	0,28g			0,1
8		0,28g			0,5
9		0,28g			1,0
10	Sem sismo	0	real	real	0,1
11		0			0,5
12		0			1,0
13	Sismo de projeto	0,14g			0,1
14		0,14g			0,5
15		0,14g			1,0
16	Sismo superestimado	0,28g			0,1
17		0,28g			0,5
18		0,28g			1,0

Posteriormente os cálculos foram extrapolados para toda a área de estudo com uso de técnica de geoprocessamento.

Em resumo, para determinação dos Fatores de Segurança seguiu-se a rotina proposta em Borchardt (2005) e representada no fluxograma do Quadro 5-3, adaptado às necessidades do presente trabalho.

**Quadro 5-3.** Fluxograma de atividades para determinação de Fator de Segurança.

Fonte: adaptado de Borchardt (2005)

## 5.1 DETERMINAÇÃO DO FATOR DE SEGURANÇA PARA COESÃO 0 E $\phi$ RETROANALISADO

### 5.1.1 CONDIÇÃO ESTÁTICA

Seguem os resultados para FS calculados para a condição estática, considerando coesão 0,  $\phi$  retroanalizado e graus de saturação 0,1, 0,5 e 1.

#### 5.1.1.1 Análise 1

A análise 1 considerou ausência de sismo, coesão 0 e grau de saturação igual a 10%. Os resultados estão na Tabela 5-1.

**Tabela 5-1.** Fator de Segurança das áreas instáveis para análise 1.

Localidade	Unidade litológica	Material	peso específico ( $\gamma$ ) kN/m <sup>3</sup>	Coesão (c) kPa	Ângulo de atrito interno ( $\phi$ )	Profundidade do plano de ruptura Z (m)	Peso específico da água ( $\gamma_a$ ) kN/m <sup>3</sup>	Grau de saturação do material m = 0,1	Ângulo crítico i (°)	FS  Estudo 1
Osomache Norte	alao	Colúvio	19	0	33	20,00	10	0,1	33	0,95
		Rda	26	0	37,2	20,88	10	0,1	37,5	0,95
Osomache	alao	Colúvio	19	0	33	28,00	10	0,1	33	0,95
		Rda	26	0	28	30,44	10	0,1	28,2	0,95
Santa Rita	alao e el pan	Colúvio	19	0	27	20,00	10	0,1	27	0,95
		Rda	26	0	25,3	31,25	10	0,1	25,5	0,95
Tubán	el pan	Colúvio	19,8	0	16	10,00	10	0,1	16	0,95
		Rda	24	0	25,4	50,85	10	0,1	25,5	0,95
Osoyacu	el pan	Colúvio	19,8	0	14	15,00	10	0,1	14	0,95
		Rda	24	0	44,6	22,73	10	0,1	44,8	0,95
Nuñurcu	el pan	Colúvio	19,8	0	23	5,00	10	0,1	23	0,95
		Rda	24	0	36	5,00	10	0,1	36,2	0,95
Llamacón	el pan	Colúvio	19	0	18	25,00	10	0,1	18	0,95
		Rda	26	0	25,5	40,45	10	0,1	25,7	0,95
Chalacay	el pan	Colúvio	19,8	0	31	17,00	10	0,1	31	0,95
		Rda	24	0	30,4	25,20	10	0,1	30,6	0,95
Quebrada Honda	alao e el pan	Colúvio	21	0	24	20,00	10	0,1	24	0,95
		Rda	24	0	60,3	23,47	10	0,1	60,5	0,95
Las Palmas	el pan	Colúvio	15,5	0	24	20,00	10	0,1	24	0,94
		Rda	21	0	25,7	21,79	10	0,1	25,7	0,95
Las Juntas	alao	Colúvio	21	0	31	23,00	10	0,1	31	0,95
		Rda	24	0	25,6	28,48	10	0,1	25,7	0,95
Média Alao-Paute		Colúvio	19,67	0,00	32,33	23,67	10,00	0,10	32,33	0,95
		Rda	25,33	0,00	30,27	26,60	10,00	0,10	30,47	0,95
Média El Pan		Colúvio	18,95	0,00	21,00	15,33	10,00	0,10	21,00	0,95
		Rda	23,83	0,00	31,27	27,67	10,00	0,10	31,42	0,95

Na condição da análise 1, os valores de FS estão abaixo da unidade, configurando situação de instabilidade instalada em todas as zonas.

#### 5.1.1.2 Análise 2

A análise 2 considerou ausência de sismo, coesão 0 e grau de saturação igual a 50%.

Os resultados estão na Tabela 5-2 e revelam valores de FS 1,05% a 5,50% inferior aos da análise 1, evidenciando a ação da água como agente redutor da estabilidade.

**Tabela 5-2.** Fator de Segurança das áreas instáveis para análise 2.

Localidade	Unidade litológica	Material	peso específico ( $\gamma$ ) kN/m <sup>3</sup>	Coesão (c) kPa	Ângulo de atrito interno ( $\phi$ )	Profundidade do plano de ruptura Z (m)	Peso específico da água ( $\gamma_a$ ) kN/m <sup>3</sup>	Grau de saturação do material m = 0,5	Ângulo crítico i (°)	FS  Estudo 2
Osomache Norte	alao	Colúvio	19	0	39	20,00	10	0,5	33	0,92
		Rda	26	0	41,8	20,88	10	0,5	37,5	0,94
Osomache	alao	Colúvio	19	0	39	28,00	10	0,5	33	0,92
		Rda	26	0	32	30,44	10	0,5	28,2	0,94
Santa Rita	alao e el pan	Colúvio	19	0	32	20,00	10	0,5	27	0,90
		Rda	26	0	29	31,25	10	0,5	25,5	0,94
Tubán	el pan	Colúvio	19,8	0	19	10,00	10	0,5	16	0,90
		Rda	24	0	29,5	50,85	10	0,5	25,5	0,94
Osoyacu	el pan	Colúvio	19,8	0	17	15,00	10	0,5	14	0,92
		Rda	24	0	49,6	22,73	10	0,5	44,8	0,94
Nuñurcu	el pan	Colúvio	19,8	0	27	5,00	10	0,5	23	0,90
		Rda	24	0	40,9	5,00	10	0,5	36,2	0,94
Llamacón	el pan	Colúvio	19	0	22	25,00	10	0,5	18	0,92
		Rda	26	0	29,3	40,45	10	0,5	25,7	0,94
Chalacay	el pan	Colúvio	19,8	0	36	17,00	10	0,5	31	0,90
		Rda	24	0	35	25,20	10	0,5	30,6	0,94
Quebrada Honda	alao e el pan	Colúvio	21	0	29	20,00	10	0,5	24	0,95
		Rda	24	0	64,5	23,47	10	0,5	60,5	0,94
Las Palmas	el pan	Colúvio	15,5	0	31	20,00	10	0,5	24	0,91
		Rda	21	0	30,5	21,79	10	0,5	25,7	0,93
Las Juntas	alao	Colúvio	21	0	36	23,00	10	0,5	31	0,92
		Rda	24	0	29,7	28,48	10	0,5	25,7	0,94
Média Alao-Paute		Colúvio	19,67	0,00	38,00	23,67	10,00	0,50	32,33	0,92
		Rda	25,33	0,00	34,50	26,60	10,00	0,50	30,47	0,94
Média El Pan		Colúvio	18,95	0,00	25,33	15,33	10,00	0,50	21,00	0,91
		Rda	23,83	0,00	35,80	27,67	10,00	0,50	31,42	0,94

### 5.1.1.3 Análise 3

A análise 3 considerou ausência de sismo, coesão 0 e grau de saturação igual a 100%.

Os resultados estão na Tabela 5-3 Tabela 5-2e revelam valores significativos de diminuição da estabilidade quando comparados com a análise 1: FS 6,03% a 24,95% inferior aos Fatores de Segurança da análise 1. Se comparado com a análise 2, esta redução varia entre 4,82% a 22,40%. Novamente atesta-se a ação da água como agente redutor da estabilidade.

**Tabela 5-3.** Fator de Segurança das áreas instáveis para análise 3.

Localidade	Unidade litológica	Material	peso específico	Coesão	Ângulo de atrito interno	Profundidade do plano de ruptura	Peso específico da água	Grau de saturação do material	Ângulo crítico	FS
			( $\gamma$ ) kN/m <sup>3</sup>	(c) kPa	( $\phi$ )	Z (m)	( $\gamma_a$ ) kN/m <sup>3</sup>	m = 1,0	i (°)	Estudo 3
Osomache Norte	alao	Colúvio	19	0	46	20,00	10	1	33	0,76
		Rda	26	0	48,1	20,88	10	1	37,5	0,89
Osomache	alao	Colúvio	19	0	46	28,00	10	1	33	0,76
		Rda	26	0	37,9	30,44	10	1	28,2	0,89
Santa Rita	alao e el pan	Colúvio	19	0	39	20,00	10	1	27	0,75
		Rda	26	0	34,7	31,25	10	1	25,5	0,89
Tubán	el pan	Colúvio	19,8	0	24	10,00	10	1	16	0,77
		Rda	24	0	35,8	50,85	10	1	25,5	0,88
Osoyacu	el pan	Colúvio	19,8	0	22	15,00	10	1	14	0,80
		Rda	24	0	56,3	22,73	10	1	44,8	0,88
Nuñurcu	el pan	Colúvio	19,8	0	34	5,00	10	1	23	0,79
		Rda	24	0	47,9	5,00	10	1	36,2	0,88
Llamacón	el pan	Colúvio	19	0	26	25,00	10	1	18	0,71
		Rda	26	0	35	40,45	10	1	25,7	0,90
Chalacay	el pan	Colúvio	19,8	0	44	17,00	10	1	31	0,80
		Rda	24	0	41,8	25,20	10	1	30,6	0,88
Quebrada Honda	alao e el pan	Colúvio	21	0	36	20,00	10	1	24	0,85
		Rda	24	0	69,5	23,47	10	1	60,5	0,88
Las Palmas	el pan	Colúvio	15,5	0	46	20,00	10	1	24	0,83
		Rda	21	0	38,2	21,79	10	1	25,7	0,86
Las Juntas	alao	Colúvio	21	0	44	23,00	10	1	31	0,84
		Rda	24	0	36,1	28,48	10	1	25,7	0,88
Média Alao-Paute		Colúvio	19,67	0,00	45,33	23,67	10,00	1,00	32,33	0,78
		Rda	25,33	0,00	40,70	26,60	10,00	1,00	30,47	0,89
Média El Pan		Colúvio	18,95	0,00	32,67	15,33	10,00	1,00	21,00	0,78
		Rda	23,83	0,00	42,50	27,67	10,00	1,00	31,42	0,88

### 5.1.2 CONDIÇÃO DINÂMICA DE PROJETO

Para a condição dinâmica de projeto, considerou-se um coeficiente de aceleração sísmica ( $K_h$ ) igual a 0,14g, e as seguintes condições de saturação: 10%, 50% e 100%.

#### 5.1.2.1 Análise 4

A análise 4 considerou aceleração sísmica de 0,14g, coesão 0 e grau de saturação igual a 10%.

Os resultados estão na Tabela 5-4Tabela 5-2 e revelam valores de FS abaixo da unidade, o que era de se esperar para um método de retroanálise baseado em situação de equilíbrio-limite.

Quando comparados estes resultados com os FS da análise 1, com igual grau de saturação, nota-se que a inclusão de ação sísmica reduziu a estabilidade entre 2,88% e 5,16%.

**Tabela 5-4.** Fator de Segurança das áreas para análise 4.

Localidade	Unidade litológica	Material	peso específico ( $\gamma$ ) kN/m <sup>3</sup>	massa específica ( $\delta$ ) g/cm <sup>3</sup>	Coesão (c) kPa	Ângulo de atrito interno ( $\phi$ )	Profundidade do plano de ruptura em colúvio e Z (m)	Espessura do material saturado $h_2 = Z/10$	Ângulo crítico i (°)	Coefficiente sísmico de projeto $K_h$ (m/s <sup>2</sup> )	FS Estudo 4
Osomache Norte	alao	Colúvio	19	1,94	0	33	20,00	2,00	33	0,14	0,92
		Rda	26	2,66	0	37,2	20,88	2,09	37,5	0,14	0,92
Osomache	alao	Colúvio	19	1,94	0	33	28,00	2,80	33	0,14	0,92
		Rda	26	2,66	0	28	30,44	3,04	28,2	0,14	0,92
Santa Rita	alao e el pan	Colúvio	19	1,94	0	27	20,00	2,00	27	0,14	0,91
		Rda	26	2,66	0	25,3	31,25	3,13	25,5	0,14	0,92
Tubán	el pan	Colúvio	19,8	2,02	0	16	10,00	1,00	16	0,14	0,90
		Rda	24	2,45	0	25,4	50,85	5,09	25,5	0,14	0,92
Osoyacu	el pan	Colúvio	19,8	2,02	0	14	15,00	1,50	14	0,14	0,89
		Rda	24	2,45	0	44,6	22,73	2,27	44,8	0,14	0,92
Nuñurcu	el pan	Colúvio	19,8	2,02	0	23	5,00	0,50	23	0,14	0,91
		Rda	24	2,45	0	36	5,00	0,50	36,2	0,14	0,92
Llamacón	el pan	Colúvio	19	1,94	0	18	25,00	2,50	18	0,14	0,90
		Rda	26	2,66	0	25,5	40,45	4,05	25,7	0,14	0,92
Chalacay	el pan	Colúvio	19,8	2,02	0	31	17,00	1,70	31	0,14	0,92
		Rda	24	2,45	0	30,4	25,20	2,52	30,6	0,14	0,92
Quebrada Honda	alao e el pan	Colúvio	21	2,15	0	24	20,00	2,00	24	0,14	0,92
		Rda	24	2,45	0	60,3	23,47	2,35	60,5	0,14	0,92
Las Palmas	el pan	Colúvio	15,5	1,58	0	24	20,00	2,00	24	0,14	0,90
		Rda	21	2,15	0	25,7	21,79	2,18	25,7	0,14	0,92
Las Juntas	alao	Colúvio	21	2,15	0	31	23,00	2,30	31	0,14	0,92
		Rda	24	2,45	0	25,6	28,48	2,85	25,7	0,14	0,92
Média Alao-Paute		Colúvio	19,67	2,01	0,00	32,33	23,67	2,37	32,33	0,14	0,92
		Rda	25,33	2,59	0,00	30,27	26,60	2,66	30,47	0,14	0,92
Média El Pan		Colúvio	18,95	1,94	0,00	21,00	15,33	1,53	21,00	0,14	0,90
		Rda	23,83	2,43	0,00	31,27	27,67	2,77	31,42	0,14	0,92

### 5.1.2.2 Análise 5

A análise 5 considerou sismo de projeto igual a 0,14g, coesão 0 e grau de saturação igual a 50%.

Os resultados estão na Tabela 5-5 e revelam valores de FS entre 0,57% e 5,67% inferior aos da análise 4, evidenciando a atuação exclusiva da água na instabilização da encosta.

Se comparados os valores de FS desta análise com os da análise 2, então observa-se que para um mesmo grau de saturação, a atuação sísmica foi o agente redutor da instabilidade, gerando FS entre 3,16% e 5,88% menores.



**Tabela 5-5.** Fator de Segurança das áreas instáveis para análise 5.

Localidade	Unidade litológica	Material	peso específico ( $\gamma$ ) kN/m <sup>3</sup>	massa específica ( $\delta$ ) g/cm <sup>3</sup>	Coesão (c) kPa	Ângulo de atrito interno ( $\phi$ )	Profundidade do plano de ruptura em colúvio e Z (m)	Espessura de material saturado $h_2 = Z/2$	Ângulo crítico $i$ (°)	Coefficiente sísmico de projeto $K_h$ (m/s <sup>2</sup> )	FS Estudo 5
Osomache Norte	alao	Colúvio	19	1,94	0	39	20,00	10,00	33	0,14	0,89
		Rda	26	2,66	0	41,8	20,88	10,44	37,5	0,14	0,91
Osomache	alao	Colúvio	19	1,94	0	39	28,00	14,00	33	0,14	0,89
		Rda	26	2,66	0	32	30,44	15,22	28,2	0,14	0,91
Santa Rita	alao e el pan	Colúvio	19	1,94	0	32	20,00	10,00	27	0,14	0,87
		Rda	26	2,66	0	29	31,25	15,63	25,5	0,14	0,90
Tubán	el pan	Colúvio	19,8	2,02	0	19	10,00	5,00	16	0,14	0,85
		Rda	24	2,45	0	29,5	50,85	25,43	25,5	0,14	0,90
Osoyacu	el pan	Colúvio	19,8	2,02	0	17	15,00	7,50	14	0,14	0,86
		Rda	24	2,45	0	49,6	22,73	11,37	44,8	0,14	0,91
Nuñurcu	el pan	Colúvio	19,8	2,02	0	27	5,00	2,50	23	0,14	0,86
		Rda	24	2,45	0	40,9	5,00	2,50	36,2	0,14	0,91
Llamacón	el pan	Colúvio	19	1,94	0	22	25,00	12,50	18	0,14	0,87
		Rda	26	2,66	0	29,3	40,45	20,23	25,7	0,14	0,91
Chalacay	el pan	Colúvio	19,8	2,02	0	36	17,00	8,50	31	0,14	0,87
		Rda	24	2,45	0	35	25,20	12,60	30,6	0,14	0,91
Quebrada Honda	alao e el pan	Colúvio	21	2,15	0	29	20,00	10,00	24	0,14	0,91
		Rda	24	2,45	0	64,5	23,47	11,74	60,5	0,14	0,90
Las Palmas	el pan	Colúvio	15,5	1,58	0	31	20,00	10,00	24	0,14	0,88
		Rda	21	2,15	0	30,5	21,79	10,90	25,7	0,14	0,90
Las Juntas	alao	Colúvio	21	2,15	0	36	23,00	11,50	31	0,14	0,89
		Rda	24	2,45	0	29,7	28,48	14,24	25,7	0,14	0,90
Média Alao-Paute		Colúvio	19,67	2,01	0,00	38,00	23,67	11,83	32,33	0,14	0,89
		Rda	25,33	2,59	0,00	34,50	26,60	13,30	30,47	0,14	0,91
Média El Pan		Colúvio	18,95	1,94	0,00	25,33	15,33	7,67	21,00	0,14	0,87
		Rda	23,83	2,43	0,00	35,80	27,67	13,84	31,42	0,14	0,90

### 5.1.2.3 Análise 6

A análise 6 considerou sismo de projeto (0,14g), coesão 0 e grau de saturação igual a 100%.

Os resultados estão na Tabela 5-8 Tabela 5-2e mostram uma redução de 5,08% a 22,67% no FS promovida pelo aumento de água no sistema, quando comparado com a análise 5. Se comparado com a análise 3, estática, esta redução varia entre 3,58% a 6,11% como resultado da ação sísmica incrementada.

**Tabela 5-6.** Fator de Segurança das áreas instáveis para análise 6.

Localidade	Unidade litológica	Material	peso específico ( $\gamma$ ) kN/m <sup>3</sup>	massa específica ( $\delta$ ) g/cm <sup>3</sup>	Coesão (c) kPa	Ângulo de atrito interno ( $\phi$ )	Profundidade do plano de ruptura em Z (m)	Espessura do material saturado h <sub>2</sub> = Z	Ângulo crítico i (°)	Coefficiente sísmico de projeto K <sub>s</sub> (m/s <sup>2</sup> )	FS Estudo 6
Osomache Norte	alao	Colúvio	19	1,94	0	46	20,00	20,00	33	0,14	0,72
		Rda	26	2,66	0	48,1	20,88	20,88	37,5	0,14	0,86
Osomache	alao	Colúvio	19	1,94	0	46	28,00	28,00	33	0,14	0,72
		Rda	26	2,66	0	37,9	30,44	30,44	28,2	0,14	0,86
Santa Rita	alao e el pan	Colúvio	19	1,94	0	39	20,00	20,00	27	0,14	0,72
		Rda	26	2,66	0	34,7	31,25	31,25	25,5	0,14	0,86
Tubán	el pan	Colúvio	19,8	2,02	0	24	10,00	10,00	16	0,14	0,73
		Rda	24	2,45	0	35,8	50,85	50,85	25,5	0,14	0,85
Osoyacu	el pan	Colúvio	19,8	2,02	0	22	15,00	15,00	14	0,14	0,75
		Rda	24	2,45	0	56,3	22,73	22,73	44,8	0,14	0,85
Nuñurcu	el pan	Colúvio	19,8	2,02	0	34	5,00	5,00	23	0,14	0,75
		Rda	24	2,45	0	47,9	5,00	5,00	36,2	0,14	0,85
Llamacón	el pan	Colúvio	19	1,94	0	26	25,00	25,00	18	0,14	0,67
		Rda	26	2,66	0	35	40,45	40,45	25,7	0,14	0,86
Chalacay	el pan	Colúvio	19,8	2,02	0	44	17,00	17,00	31	0,14	0,76
		Rda	24	2,45	0	41,8	25,20	25,20	30,6	0,14	0,85
Quebrada Honda	alao e el pan	Colúvio	21	2,15	0	36	20,00	20,00	24	0,14	0,82
		Rda	24	2,45	0	69,5	23,47	23,47	60,5	0,14	0,84
Las Palmas	el pan	Colúvio	15,5	1,58	0	46	20,00	20,00	24	0,14	0,79
		Rda	21	2,15	0	38,2	21,79	21,79	25,7	0,14	0,82
Las Juntas	alao	Colúvio	21	2,15	0	44	23,00	23,00	31	0,14	0,81
		Rda	24	2,45	0	36,1	28,48	28,48	25,7	0,14	0,85
Média Alao-Paute		Colúvio	19,67	2,01	0,00	45,33	23,67	23,67	32,33	0,14	0,75
		Rda	25,33	2,59	0,00	40,70	26,60	26,60	30,47	0,14	0,86
Média El Pan		Colúvio	18,95	1,94	0,00	32,67	15,33	15,33	21,00	0,14	0,74
		Rda	23,83	2,43	0,00	42,50	27,67	27,67	31,42	0,14	0,85

### 5.1.3 CONDIÇÃO DINÂMICA SUPERESTIMADA

Na hipótese de ocorrência de um coeficiente de aceleração sísmico igual ao dobro do valor de projeto (K<sub>s</sub> igual a 0,28g), o Fator de Segurança foi calculado igualmente para as três condições de saturação das demais análises.

#### 5.1.3.1 Análise 7

A análise 7 considerou aceleração sísmica superestimada de 0,28g, coesão 0 e grau de saturação igual a 10%.

Os resultados estão na Tabela 5-7. Se comparados com a análise 1, na qual o grau de saturação é o mesmo (10%) porém sem aceleração sísmica, observa-se que FS reduz entre 5,68% a 10,97% por conta deste parâmetro. Em relação à análise 4, esta redução varia entre 2,88% e 5,50%.

**Tabela 5-7.** Fator de Segurança das áreas instáveis para análise 7.

Localidade	Unidade litológica	Material	peso específico ( $\gamma$ ) kN/m <sup>3</sup>	massa específica ( $\delta$ ) g/cm <sup>3</sup>	Coesão (c) kPa	Ângulo de atrito interno ( $\phi$ )	Profundidade do plano de ruptura em colúvio e rocha Z (m)	Espessura do material saturado $h_2 = Z/10$	Ângulo crítico i (°)	Coefficiente sísmico superestimado $K_h$ (m/s <sup>2</sup> )	FS Estudo 7
Osomache Norte	alao	Colúvio	19	1,94	0	33	20,00	2,00	33	0,28	0,89
		Rda	26	2,66	0	37,2	20,88	2,09	37,5	0,28	0,90
Osomache	alao	Colúvio	19	1,94	0	33	28,00	2,80	33	0,28	0,89
		Rda	26	2,66	0	28	30,44	3,04	28,2	0,28	0,89
Santa Rita	alao e el pan	Colúvio	19	1,94	0	27	20,00	2,00	27	0,28	0,88
		Rda	26	2,66	0	25,3	31,25	3,13	25,5	0,28	0,89
Tubán	el pan	Colúvio	19,8	2,02	0	16	10,00	1,00	16	0,28	0,86
		Rda	24	2,45	0	25,4	50,85	5,09	25,5	0,28	0,89
Osoyacu	el pan	Colúvio	19,8	2,02	0	14	15,00	1,50	14	0,28	0,85
		Rda	24	2,45	0	44,6	22,73	2,27	44,8	0,28	0,90
Nuñurcu	el pan	Colúvio	19,8	2,02	0	23	5,00	0,50	23	0,28	0,88
		Rda	24	2,45	0	36	5,00	0,50	36,2	0,28	0,90
Llamacón	el pan	Colúvio	19	1,94	0	18	25,00	2,50	18	0,28	0,86
		Rda	26	2,66	0	25,5	40,45	4,05	25,7	0,28	0,89
Chalacay	el pan	Colúvio	19,8	2,02	0	31	17,00	1,70	31	0,28	0,89
		Rda	24	2,45	0	30,4	25,20	2,52	30,6	0,28	0,89
Quebrada Honda	alao e el pan	Colúvio	21	2,15	0	24	20,00	2,00	24	0,28	0,88
		Rda	24	2,45	0	60,3	23,47	2,35	60,5	0,28	0,89
Las Palmas	el pan	Colúvio	15,5	1,58	0	24	20,00	2,00	24	0,28	0,87
		Rda	21	2,15	0	25,7	21,79	2,18	25,7	0,28	0,89
Las Juntas	alao	Colúvio	21	2,15	0	31	23,00	2,30	31	0,28	0,89
		Rda	24	2,45	0	25,6	28,48	2,85	25,7	0,28	0,89
Média Alao-Paute		Colúvio	19,67	2,01	0,00	32,33	23,67	2,37	32,33	0,28	0,89
		Rda	25,33	2,59	0,00	30,27	26,60	2,66	30,47	0,28	0,89
Média El Pan		Colúvio	18,95	1,94	0,00	21,00	15,33	1,53	21,00	0,28	0,87
		Rda	23,83	2,43	0,00	31,27	27,67	2,77	31,42	0,28	0,89

### 5.1.3.2 Análise 8

A análise 5 considerou sismo superestimado de 0,28g, coesão 0 e grau de saturação igual a 50%.

Os resultados estão na Tabela 5-8 e revelam valores de FS entre 0,74% e 5,83% inferior aos da análise 7, provocado pelo aumento de água no sistema.

Se comparados os valores de FS desta análise com os da análise 2, de igual percentual de saturação mas sem sismo, observa-se que a atuação sísmica reduziu a estabilidade entre 6,21% e 11,15%.

**Tabela 5-8.** Fator de Segurança das áreas instáveis para análise 8.

Localidade	Unidade litológica	Material	peso específico ( $\gamma$ ) kN/m <sup>3</sup>	massa específica ( $\delta$ ) g/cm <sup>3</sup>	Coesão (c) kPa	Ângulo de atrito interno ( $\phi$ )	Profundidade do plano de ruptura em colúvio e rocha Z (m)	Espessura de material saturado $h_2 = Z/2$	Ângulo crítico $i$ (°)	Coefficiente sísmico superestimado $K_h$ (m/s <sup>2</sup> )	FS Estudo 8
Osomache Norte	alao	Colúvio	19	1,94	0	39	20,00	10,00	33	0,28	0,86
		Rda	26	2,66	0	41,8	20,88	10,44	37,5	0,28	0,88
Osomache	alao	Colúvio	19	1,94	0	39	28,00	14,00	33	0,28	0,86
		Rda	26	2,66	0	32	30,44	15,22	28,2	0,28	0,88
Santa Rita	alao e el pan	Colúvio	19	1,94	0	32	20,00	10,00	27	0,28	0,84
		Rda	26	2,66	0	29	31,25	15,63	25,5	0,28	0,87
Tubán	el pan	Colúvio	19,8	2,02	0	19	10,00	5,00	16	0,28	0,81
		Rda	24	2,45	0	29,5	50,85	25,43	25,5	0,28	0,87
Osoyacu	el pan	Colúvio	19,8	2,02	0	17	15,00	7,50	14	0,28	0,81
		Rda	24	2,45	0	49,6	22,73	11,37	44,8	0,28	0,88
Nuñurcu	el pan	Colúvio	19,8	2,02	0	27	5,00	2,50	23	0,28	0,83
		Rda	24	2,45	0	40,9	5,00	2,50	36,2	0,28	0,88
Llamacón	el pan	Colúvio	19	1,94	0	22	25,00	12,50	18	0,28	0,83
		Rda	26	2,66	0	29,3	40,45	20,23	25,7	0,28	0,87
Chalacay	el pan	Colúvio	19,8	2,02	0	36	17,00	8,50	31	0,28	0,84
		Rda	24	2,45	0	35	25,20	12,60	30,6	0,28	0,87
Quebrada Honda	alao e el pan	Colúvio	21	2,15	0	29	20,00	10,00	24	0,28	0,88
		Rda	24	2,45	0	64,5	23,47	11,74	60,5	0,28	0,87
Las Palmas	el pan	Colúvio	15,5	1,58	0	31	20,00	10,00	24	0,28	0,84
		Rda	21	2,15	0	30,5	21,79	10,90	25,7	0,28	0,86
Las Juntas	alao	Colúvio	21	2,15	0	36	23,00	11,50	31	0,28	0,86
		Rda	24	2,45	0	29,7	28,48	14,24	25,7	0,28	0,87
Média Alao-Paute		Colúvio	19,67	2,01	0,00	38,00	23,67	11,83	32,33	0,28	0,86
		Rda	25,33	2,59	0,00	34,50	26,60	13,30	30,47	0,28	0,88
Média El Pan		Colúvio	18,95	1,94	0,00	25,33	15,33	7,67	21,00	0,28	0,83
		Rda	23,83	2,43	0,00	35,80	27,67	13,84	31,42	0,28	0,87

### 5.1.3.3 Análise 9

A análise 9 considerou sismo superestimado de 0,28g, coesão 0 e grau de saturação igual a 100%.

Os resultados estão na Tabela 5-9 e revelam valores de FS entre 5,34% e 22,95% inferior aos da análise 7, provocado pelo aumento de água no sistema.

Se comparados os valores de FS desta análise com os da análise 3, de igual percentual de saturação porém em condição estática, observa-se que a atuação sísmica reduziu a estabilidade entre 7,03% e 11,58%.

**Tabela 5-9.** Fator de Segurança das áreas instáveis para análise 9.

Localidade	Unidade litológica	Material	peso específico ( $\gamma$ ) kN/m <sup>3</sup>	massa específica ( $\delta$ ) g/cm <sup>3</sup>	Coesão (c) kPa	Ângulo de atrito interno ( $\phi$ )	Profundidade do plano de ruptura em colúvio e Z (m)	Espessura do material saturado $h_2 = Z$	Ângulo crítico $i$ (°)	Coefficiente sísmico superestimado $K_a$ (m/s <sup>2</sup> )	FS Estudo 9
Osomache Norte	alao	Colúvio	19	1,94	0	46	20,00	20,00	33	0,28	0,70
		Rda	26	2,66	0	48,1	20,88	20,88	37,5	0,28	0,83
Osomache	alao	Colúvio	19	1,94	0	46	28,00	28,00	33	0,28	0,70
		Rda	26	2,66	0	37,9	30,44	30,44	28,2	0,28	0,83
Santa Rita	alao e el pan	Colúvio	19	1,94	0	39	20,00	20,00	27	0,28	0,69
		Rda	26	2,66	0	34,7	31,25	31,25	25,5	0,28	0,82
Tubán	el pan	Colúvio	19,8	2,02	0	24	10,00	10,00	16	0,28	0,69
		Rda	24	2,45	0	35,8	50,85	50,85	25,5	0,28	0,81
Osoyacu	el pan	Colúvio	19,8	2,02	0	22	15,00	15,00	14	0,28	0,71
		Rda	24	2,45	0	56,3	22,73	22,73	44,8	0,28	0,81
Nuñurcu	el pan	Colúvio	19,8	2,02	0	34	5,00	5,00	23	0,28	0,72
		Rda	24	2,45	0	47,9	5,00	5,00	36,2	0,28	0,82
Llamacón	el pan	Colúvio	19	1,94	0	26	25,00	25,00	18	0,28	0,64
		Rda	26	2,66	0	35	40,45	40,45	25,7	0,28	0,83
Chalacay	el pan	Colúvio	19,8	2,02	0	44	17,00	17,00	31	0,28	0,73
		Rda	24	2,45	0	41,8	25,20	25,20	30,6	0,28	0,82
Quebrada Honda	alao e el pan	Colúvio	21	2,15	0	36	20,00	20,00	24	0,28	0,78
		Rda	24	2,45	0	69,5	23,47	23,47	60,5	0,28	0,79
Las Palmas	el pan	Colúvio	15,5	1,58	0	46	20,00	20,00	24	0,28	0,75
		Rda	21	2,15	0	38,2	21,79	21,79	25,7	0,28	0,79
Las Juntas	alao	Colúvio	21	2,15	0	44	23,00	23,00	31	0,28	0,78
		Rda	24	2,45	0	36,1	28,48	28,48	25,7	0,28	0,81
Média Alao-Paute		Colúvio	19,67	2,01	0,00	45,33	23,67	23,67	32,33	0,28	0,72
		Rda	25,33	2,59	0,00	40,70	26,60	26,60	30,47	0,28	0,82
Média El Pan		Colúvio	18,95	1,94	0,00	32,67	15,33	15,33	21,00	0,28	0,71
		Rda	23,83	2,43	0,00	42,50	27,67	27,67	31,42	0,28	0,81

## 5.2 DETERMINAÇÃO DO FATOR DE SEGURANÇA COM PARÂMETROS REAIS

Como casos reais enquadram-se as análises feitas com base nos resultados de coesão e ângulo de atrito determinados em ensaios de laboratório.

Sob estes critérios aplicou-se novamente as fórmulas de Fator de Segurança para as situações estática, dinâmica (com coeficiente sísmico de projeto) e ainda dinâmica superestimada (com coeficiente sísmico dobrado); considerando mesmos graus de saturação das análises anteriores: 10%, 50% e 100%. Os resultados são demonstrados a seguir.

### 5.2.1 CONDIÇÃO ESTÁTICA

#### 5.2.1.1 Análise 10

A análise 10 considerou ausência de sismo, coesão e  $\phi$  reais, e grau de saturação igual a 10%.

Os resultados estão na Tabela 5-10 e revelam valores de FS em média superiores aos das análises 1 a 9 em função da presença de coesão nos materiais analisados.

**Tabela 5-10.** Fator de Segurança das áreas instáveis para análise 10.

Localidade	Unidade litológica	Material	peso específico ( $\gamma$ ) kN/m <sup>3</sup>	Coesão real (c) kPa	Ângulo de atrito interno real ( $\phi$ )	Profundidade do plano de ruptura Z (m)	Peso específico da água ( $\gamma_a$ ) kN/m <sup>3</sup>	Grau de saturação do material m = 0,1	Ângulo crítico i (°)	FS Estudo 10
Osomache Norte	alao	Colúvio	19	60	35	20,00	10	0,1	33	1,37
		Rda	26	250	36	20,88	10	0,1	37,5	1,86
Osomache	alao	Colúvio	19	60	35	28,00	10	0,1	33	1,27
		Rda	26	250	36	30,44	10	0,1	28,2	2,06
Santa Rita	alao e el pan	Colúvio	19	60	35	20,00	10	0,1	27	1,69
		Rda	26	250	36	31,25	10	0,1	25,5	2,26
Tubán	el pan	Colúvio	19,8	40	25	10,00	10	0,1	16	2,31
		Rda	24	100	30	50,85	10	0,1	25,5	1,37
Osoyacu	el pan	Colúvio	19,8	40	25	15,00	10	0,1	14	2,35
		Rda	24	100	30	22,73	10	0,1	44,8	0,92
Nuñurcu	el pan	Colúvio	19,8	40	20	5,00	10	0,1	23	1,94
		Rda	24	100	33	5,00	10	0,1	36,2	2,60
Llamacón	el pan	Colúvio	19	35	28	25,00	10	0,1	18	1,80
		Rda	26	200	36	40,45	10	0,1	25,7	1,94
Chalacay	el pan	Colúvio	19,8	40	20	17,00	10	0,1	31	0,84
		Rda	24	100	33	25,20	10	0,1	30,6	1,43
Quebrada Honda	alao e el pan	Colúvio	21	29	27	20,00	10	0,1	24	1,28
		Rda	24	35	34	23,47	10	0,1	60,5	0,51
Las Palmas	el pan	Colúvio	15,5	35	25	20,00	10	0,1	24	1,28
		Rda	21	40	35	21,79	10	0,1	25,7	1,61
Las Juntas	alao	Colúvio	21	35	33	23,00	10	0,1	31	1,19
		Rda	24	35	37	28,48	10	0,1	25,7	1,63
Média Alao-Paute		Colúvio	19,67	51,67	34,33	23,67	10,00	0,10	32,33	1,28
		Rda	25,33	178,33	36,33	26,60	10,00	0,10	30,47	1,85
Média El Pan		Colúvio	18,95	38,33	23,83	15,33	10,00	0,10	21,00	1,75
		Rda	23,83	106,67	32,83	27,67	10,00	0,10	31,42	1,65

### 5.2.1.2 Análise 11

A análise 11 considerou ausência de sismo, coesão e  $\phi$  reais, e grau de saturação igual a 50%.

Os resultados estão na Tabela 5-11, onde FS mostra-se 5,69% a 21,06% menor que na análise 10 por conta do incremento de água no sistema.

**Tabela 5-11.** Fator de Segurança das áreas instáveis para análise 11.

Localidade	Unidade litológica	Material	peso específico ( $\gamma$ ) kN/m <sup>3</sup>	Coesão real (c) kPa	Ângulo de atrito interno real ( $\phi$ )	Profundidade do plano de ruptura Z (m)	Peso específico da água ( $\gamma_a$ ) kN/m <sup>3</sup>	Grau de saturação do material de 50% m = 0,5	Ângulo crítico i (°)	FS Estudo 11
Osomache Norte	alao	Colúvio	19	60	35	20,00	10	0,5	33	1,14
		Rda	26	250	36	20,88	10	0,5	37,5	1,72
Osomache	alao	Colúvio	19	60	35	28,00	10	0,5	33	1,04
		Rda	26	250	36	30,44	10	0,5	28,2	1,85
Santa Rita	alao e el pan	Colúvio	19	60	35	20,00	10	0,5	27	1,40
		Rda	26	250	36	31,25	10	0,5	25,5	2,02
Tubán	el pan	Colúvio	19,8	40	25	10,00	10	0,5	16	1,98
		Rda	24	100	30	50,85	10	0,5	25,5	1,17
Osoyacu	el pan	Colúvio	19,8	40	25	15,00	10	0,5	14	1,97
		Rda	24	100	30	22,73	10	0,5	44,8	0,83
Nuñurcu	el pan	Colúvio	19,8	40	20	5,00	10	0,5	23	1,76
		Rda	24	100	33	5,00	10	0,5	36,2	2,45
Llamacón	el pan	Colúvio	19	35	28	25,00	10	0,5	18	1,46
		Rda	26	200	36	40,45	10	0,5	25,7	1,71
Chalacay	el pan	Colúvio	19,8	40	20	17,00	10	0,5	31	0,72
		Rda	24	100	33	25,20	10	0,5	30,6	1,25
Quebrada Honda	alao e el pan	Colúvio	21	29	27	20,00	10	0,5	24	1,06
		Rda	24	35	34	23,47	10	0,5	60,5	0,45
Las Palmas	el pan	Colúvio	15,5	35	25	20,00	10	0,5	24	1,01
		Rda	21	40	35	21,79	10	0,5	25,7	1,33
Las Juntas	alao	Colúvio	21	35	33	23,00	10	0,5	31	0,99
		Rda	24	35	37	28,48	10	0,5	25,7	1,37
Média Alao-Paute		Colúvio	19,67	51,67	34,33	23,67	10,00	0,50	32,33	1,06
		Rda	25,33	178,33	36,33	26,60	10,00	0,50	30,47	1,65
Média El Pan		Colúvio	18,95	38,33	23,83	15,33	10,00	0,50	21,00	1,48
		Rda	23,83	106,67	32,83	27,67	10,00	0,50	31,42	1,46

### 5.2.1.3 Análise 12

A Tabela 5-12 mostra os resultados de FS para a análise que considera os parâmetros geotécnicos reais (c e  $\phi$ ) dos materiais, grau de saturação de 100% e ausência de sismo.

A saturação total dos materiais (m = 1) reduziu o FS entre 17,58% a 47,38%, quando comparado os resultados desta análise com os da análise 10, onde havia apenas 10% de água no sistema.



**Tabela 5-12.** Fator de Segurança das áreas instáveis para análise 12.

Localidade	Unidade litológica	Material	peso específico ( $\gamma$ ) kN/m <sup>3</sup>	Coesão real (c) kPa	Ângulo de atrito interno real ( $\phi$ )	Profundidade do plano de ruptura Z (m)	Peso específico da água ( $\gamma_a$ ) kN/m <sup>3</sup>	Grau de saturação do material de 100% m = 1,0	Ângulo crítico i (°)	FS Estudo 12
Osomache Norte	alao	Colúvio	19	60	35	20,00	10	1	33	0,86
		Rda	26	250	36	20,88	10	1	37,5	1,54
Osomache	alao	Colúvio	19	60	35	28,00	10	1	33	0,76
		Rda	26	250	36	30,44	10	1	28,2	1,59
Santa Rita	alao e el pan	Colúvio	19	60	35	20,00	10	1	27	1,04
		Rda	26	250	36	31,25	10	1	25,5	1,73
Tubán	el pan	Colúvio	19,8	40	25	10,00	10	1	16	1,57
		Rda	24	100	30	50,85	10	1	25,5	0,92
Osoyacu	el pan	Colúvio	19,8	40	25	15,00	10	1	14	1,50
		Rda	24	100	30	22,73	10	1	44,8	0,71
Nuñurcu	el pan	Colúvio	19,8	40	20	5,00	10	1	23	1,55
		Rda	24	100	33	5,00	10	1	36,2	2,27
Llamacón	el pan	Colúvio	19	35	28	25,00	10	1	18	1,03
		Rda	26	200	36	40,45	10	1	25,7	1,42
Chalacay	el pan	Colúvio	19,8	40	20	17,00	10	1	31	0,57
		Rda	24	100	33	25,20	10	1	30,6	1,02
Quebrada Honda	alao e el pan	Colúvio	21	29	27	20,00	10	1	24	0,79
		Rda	24	35	34	23,47	10	1	60,5	0,37
Las Palmas	el pan	Colúvio	15,5	35	25	20,00	10	1	24	0,68
		Rda	21	40	35	21,79	10	1	25,7	0,99
Las Juntas	alao	Colúvio	21	35	33	23,00	10	1	31	0,73
		Rda	24	35	37	28,48	10	1	25,7	1,04
Média Alao-Paute		Colúvio	19,67	51,67	34,33	23,67	10,00	1,00	32,33	0,78
		Rda	25,33	178,33	36,33	26,60	10,00	1,00	30,47	1,39
Média El Pan		Colúvio	18,95	38,33	23,83	15,33	10,00	1,00	21,00	1,15
		Rda	23,83	106,67	32,83	27,67	10,00	1,00	31,42	1,22

## 5.2.2 CONDIÇÃO DINÂMICA DE PROJETO

Como condição dinâmica de projeto, incluiu-se o coeficiente sísmico de 0,14g no cálculo do Fator de Segurança e os resultados são apresentados a seguir.

### 5.2.2.1 Análise 13

A Tabela 5-13 mostra os resultados de FS para a análise que considera os parâmetros geotécnicos reais (c e  $\phi$ ) dos materiais, grau de saturação de 10% e presença de sismo de 0,14g.

Comparados estes com os resultados da análise 10 de igual condição de saturação, porém sem sismo, então nota-se que o incremento desta variável reduziu a estabilidade entre 2,38% e 5,69%.

**Tabela 5-13.** Fator de Segurança das áreas instáveis para análise 13.

Localidade	Unidade litológica	Material	peso específico ( $\gamma$ ) kN/m <sup>3</sup>	massa específica ( $\delta$ ) g/cm <sup>3</sup>	Coesão real (c) kPa	Ângulo de atrito interno real ( $\phi$ )	Profundidade do plano de ruptura em colúvio e Z (m)	Espessura do material saturado $h_2 = Z/10$	Ângulo crítico $i$ (°)	Coefficiente sísmico de projeto $K_h$ (m/s <sup>2</sup> )	FS Estudo 13
Osomache Norte	alao	Colúvio	19	1,94	60	35	20,00	2,00	33	0,14	1,33
		Rda	26	2,66	250	36	20,88	2,09	37,5	0,14	1,82
Osomache	alao	Colúvio	19	1,94	60	35	28,00	2,80	33	0,14	1,23
		Rda	26	2,66	250	36	30,44	3,04	28,2	0,14	2,00
Santa Rita	alao e el pan	Colúvio	19	1,94	60	35	20,00	2,00	27	0,14	1,64
		Rda	26	2,66	250	36	31,25	3,13	25,5	0,14	2,18
Tubán	el pan	Colúvio	19,8	2,02	40	25	10,00	1,00	16	0,14	2,19
		Rda	24	2,45	100	30	50,85	5,09	25,5	0,14	1,32
Osoyacu	el pan	Colúvio	19,8	2,02	40	25	15,00	1,50	14	0,14	2,22
		Rda	24	2,45	100	30	22,73	2,27	44,8	0,14	0,90
Nuñurcu	el pan	Colúvio	19,8	2,02	40	20	5,00	0,50	23	0,14	1,87
		Rda	24	2,45	100	33	5,00	0,50	36,2	0,14	2,54
Llamacón	el pan	Colúvio	19	1,94	35	28	25,00	2,50	18	0,14	1,72
		Rda	26	2,66	200	36	40,45	4,05	25,7	0,14	1,87
Chalacay	el pan	Colúvio	19,8	2,02	40	20	17,00	1,70	31	0,14	0,82
		Rda	24	2,45	100	33	25,20	2,52	30,6	0,14	1,39
Quebrada Honda	alao e el pan	Colúvio	21	2,15	29	27	20,00	2,00	24	0,14	1,23
		Rda	24	2,45	35	34	23,47	2,35	60,5	0,14	0,50
Las Palmas	el pan	Colúvio	15,5	1,58	35	25	20,00	2,00	24	0,14	1,24
		Rda	21	2,15	40	35	21,79	2,18	25,7	0,14	1,55
Las Juntas	alao	Colúvio	21	2,15	35	33	23,00	2,30	31	0,14	1,16
		Rda	24	2,45	35	37	28,48	2,85	25,7	0,14	1,57
Média Alao-Paute		Colúvio	19,67	2,01	51,67	34,33	23,67	2,37	32,33	0,14	1,24
		Rda	25,33	2,59	178,33	36,33	26,60	2,66	30,47	0,14	1,80
Média El Pan		Colúvio	18,95	1,94	38,33	23,83	15,33	1,53	21,00	0,14	1,68
		Rda	23,83	2,43	106,67	32,83	27,67	2,77	31,42	0,14	1,60

### 5.2.2.2 Análise 14

A Tabela 5-14 mostra os resultados de FS para a análise que considera os parâmetros geotécnicos reais (c e  $\phi$ ) dos materiais, grau de saturação de 50% e presença de sismo de 0,14g.

Se comparados os valores de FS desta análise com os da análise 13, tem-se que o aumento de saturação no sistema reduziu entre 5,71% e 21,17% a estabilidade do mesmo.

Se comparados os valores de FS desta análise com os da análise 11, de igual grau de saturação mas estática, tem-se uma redução entre 2,29% e 5,74% por conta da aceleração sísmica adicionada aos cálculos.

**Tabela 5-14.** Fator de Segurança das áreas instáveis para análise 14.

Localidade	Unidade litológica	Material	peso específico ( $\gamma$ ) kN/m <sup>3</sup>	massa específica ( $\delta$ ) g/cm <sup>3</sup>	Coesão real (c) kPa	Ângulo de atrito interno ( $\phi$ )	Profundidade do plano de ruptura em colúvio e Z (m)	Espessura de material saturado $h_2 = Z/2$	Ângulo crítico $i$ (°)	Coefficiente sísmico de projeto $K_h$ (m/s <sup>2</sup> )	FS Estudo 14
Osomache Norte	alao	Colúvio	19	1,94	60	35	20,00	10,00	33	0,14	1,11
		Rda	26	2,66	250	36	20,88	10,44	37,5	0,14	1,68
Osomache	alao	Colúvio	19	1,94	60	35	28,00	14,00	33	0,14	1,01
		Rda	26	2,66	250	36	30,44	15,22	28,2	0,14	1,79
Santa Rita	alao e el pan	Colúvio	19	1,94	60	35	20,00	10,00	27	0,14	1,35
		Rda	26	2,66	250	36	31,25	15,63	25,5	0,14	1,95
Tubán	el pan	Colúvio	19,8	2,02	40	25	10,00	5,00	16	0,14	1,88
		Rda	24	2,45	100	30	50,85	25,43	25,5	0,14	1,13
Osoyacu	el pan	Colúvio	19,8	2,02	40	25	15,00	7,50	14	0,14	1,86
		Rda	24	2,45	100	30	22,73	11,37	44,8	0,14	0,81
Nuñurcu	el pan	Colúvio	19,8	2,02	40	20	5,00	2,50	23	0,14	1,70
		Rda	24	2,45	100	33	5,00	2,50	36,2	0,14	2,39
Llamacón	el pan	Colúvio	19	1,94	35	28	25,00	12,50	18	0,14	1,39
		Rda	26	2,66	200	36	40,45	20,23	25,7	0,14	1,65
Chalacay	el pan	Colúvio	19,8	2,02	40	20	17,00	8,50	31	0,14	0,70
		Rda	24	2,45	100	33	25,20	12,60	30,6	0,14	1,21
Quebrada Honda	alao e el pan	Colúvio	21	2,15	29	27	20,00	10,00	24	0,14	1,02
		Rda	24	2,45	35	34	23,47	11,74	60,5	0,14	0,43
Las Palmas	el pan	Colúvio	15,5	1,58	35	25	20,00	10,00	24	0,14	0,98
		Rda	21	2,15	40	35	21,79	10,90	25,7	0,14	1,28
Las Juntas	alao	Colúvio	21	2,15	35	33	23,00	11,50	31	0,14	0,96
		Rda	24	2,45	35	37	28,48	14,24	25,7	0,14	1,32
Média Alao-Paute		Colúvio	19,67	2,01	51,67	34,33	23,67	11,83	32,33	0,14	1,02
		Rda	25,33	2,59	178,33	36,33	26,60	13,30	30,47	0,14	1,60
Média El Pan		Colúvio	18,95	1,94	38,33	23,83	15,33	7,67	21,00	0,14	1,42
		Rda	23,83	2,43	106,67	32,83	27,67	13,84	31,42	0,14	1,41

### 5.2.2.3 Análise 15

A Tabela 5-15 mostra os resultados de FS para a análise que considera os parâmetros geotécnicos reais (c e  $\phi$ ) dos materiais, grau de saturação de 100% e presença de sismo de 0,14g.

Se comparados os valores de FS desta análise com os da análise 13, nota-se que a saturação plena do sistema reduziu entre 12,85% e 47,62% a estabilidade do mesmo.

Comparando os resultados desta análise com os da análise 12, de igual grau de saturação mas estática, tem-se uma redução entre 2,32% e 5,85% por conta da aceleração sísmica adicionada aos cálculos.

**Tabela 5-15.** Fator de Segurança das áreas instáveis para análise 15.

Localidade	Unidade litológica	Material	peso específico ( $\gamma$ ) kN/m <sup>3</sup>	massa específica ( $\delta$ ) g/cm <sup>3</sup>	Coesão real (c) kPa	Ângulo de atrito interno ( $\phi$ )	Profundidade do plano de ruptura em colúvio e Z (m)	Espessura de material saturado $h_2 = Z$	Ângulo crítico $i$ (°)	Coefficiente sísmico de projeto $K_h$ (m/s <sup>2</sup> )	FS Estudo 15
Osomache Norte	alao	Colúvio	19	1,94	60	35	20,00	20,00	33	0,14	0,83
		Rda	26	2,66	250	36	20,88	20,88	37,5	0,14	1,50
Osomache	alao	Colúvio	19	1,94	60	35	28,00	28,00	33	0,14	0,73
		Rda	26	2,66	250	36	30,44	30,44	28,2	0,14	1,54
Santa Rita	alao e el pan	Colúvio	19	1,94	60	35	20,00	20,00	27	0,14	1,00
		Rda	26	2,66	250	36	31,25	31,25	25,5	0,14	1,67
Tubán	el pan	Colúvio	19,8	2,02	40	25	10,00	10,00	16	0,14	1,49
		Rda	24	2,45	100	30	50,85	50,85	25,5	0,14	0,88
Osoyacu	el pan	Colúvio	19,8	2,02	40	25	15,00	15,00	14	0,14	1,41
		Rda	24	2,45	100	30	22,73	22,73	44,8	0,14	0,69
Nuñurcu	el pan	Colúvio	19,8	2,02	40	20	5,00	5,00	23	0,14	1,49
		Rda	24	2,45	100	33	5,00	5,00	36,2	0,14	2,21
Llamacón	el pan	Colúvio	19	1,94	35	28	25,00	25,00	18	0,14	0,98
		Rda	26	2,66	200	36	40,45	40,45	25,7	0,14	1,36
Chalacay	el pan	Colúvio	19,8	2,02	40	20	17,00	17,00	31	0,14	0,55
		Rda	24	2,45	100	33	25,20	25,20	30,6	0,14	0,98
Quebrada Honda	alao e el pan	Colúvio	21	2,15	29	27	20,00	20,00	24	0,14	0,75
		Rda	24	2,45	35	34	23,47	23,47	60,5	0,14	0,36
Las Palmas	el pan	Colúvio	15,5	1,58	35	25	20,00	20,00	24	0,14	0,65
		Rda	21	2,15	40	35	21,79	21,79	25,7	0,14	0,95
Las Juntas	alao	Colúvio	21	2,15	35	33	23,00	23,00	31	0,14	0,70
		Rda	24	2,45	35	37	28,48	28,48	25,7	0,14	1,00
Média Alao-Paute		Colúvio	19,67	2,01	51,67	34,33	23,67	23,67	32,33	0,14	0,75
		Rda	25,33	2,59	178,33	36,33	26,60	26,60	30,47	0,14	1,35
Média El Pan		Colúvio	18,95	1,94	38,33	23,83	15,33	15,33	21,00	0,14	1,09
		Rda	23,83	2,43	106,67	32,83	27,67	27,67	31,42	0,14	1,18

### 5.2.3 CONDIÇÃO DINÂMICA SUPERESTIMADA

Como condição dinâmica superestimada, considerou-se o coeficiente sísmico igual a 0,28g no cálculo do Fator de Segurança e os resultados são apresentados a seguir.

#### 5.2.3.1 Análise 16

A Tabela 5-16 mostra os resultados de FS para a análise que considera os parâmetros c e  $\phi$  reais, coeficiente sísmico igual a 0,28g e grau de saturação dos terrenos em 10%.

Comparados estes valores com os resultados da análise 10 de igual condição de saturação, porém sem sismo, então nota-se que o incremento desta variável reduziu a estabilidade entre 4,45% e 10,80%.

Em termos de contribuição sísmica, os resultados mostram que o aumento da aceleração para 0,28g reduziu a estabilidade entre 2,23% a 5,42%, quando comparado com

o FS da análise 13, que possui mesma condição de saturação, porém sismo reduzido à metade.

**Tabela 5-16.** Fator de Segurança das áreas instáveis para análise 16.

Localidade	Unidade litológica	Material	peso específico ( $\gamma$ ) kN/m <sup>3</sup>	massa específica ( $\delta$ ) g/cm <sup>3</sup>	Coesão real (c) kPa	Ângulo de atrito interno real ( $\phi$ )	Profundidade do plano de ruptura em colúvio e Z (m)	Espessura do material saturado $h_2 = Z/10$	Ângulo crítico $i$ (°)	Coefficiente sísmico superestimado $K_h$ (m/s <sup>2</sup> )	FS Estudo 16
Osomache Norte	alao	Colúvio	19	1,94	60	35	20,00	2,00	33	0,28	1,29
		Rda	26	2,66	250	36	20,88	2,09	37,5	0,28	1,78
Osomache	alao	Colúvio	19	1,94	60	35	28,00	2,80	33	0,28	1,20
		Rda	26	2,66	250	36	30,44	3,04	28,2	0,28	1,94
Santa Rita	alao e el pan	Colúvio	19	1,94	60	35	20,00	2,00	27	0,28	1,58
		Rda	26	2,66	250	36	31,25	3,13	25,5	0,28	2,11
Tubán	el pan	Colúvio	19,8	2,02	40	25	10,00	1,00	16	0,28	2,09
		Rda	24	2,45	100	30	50,85	5,09	25,5	0,28	1,28
Osoyacu	el pan	Colúvio	19,8	2,02	40	25	15,00	1,50	14	0,28	2,10
		Rda	24	2,45	100	30	22,73	2,27	44,8	0,28	0,88
Nuñurcu	el pan	Colúvio	19,8	2,02	40	20	5,00	0,50	23	0,28	1,81
		Rda	24	2,45	100	33	5,00	0,50	36,2	0,28	2,48
Llamacón	el pan	Colúvio	19	1,94	35	28	25,00	2,50	18	0,28	1,64
		Rda	26	2,66	200	36	40,45	4,05	25,7	0,28	1,81
Chalacay	el pan	Colúvio	19,8	2,02	40	20	17,00	1,70	31	0,28	0,80
		Rda	24	2,45	100	33	25,20	2,52	30,6	0,28	1,35
Quebrada Honda	alao e el pan	Colúvio	21	2,15	29	27	20,00	2,00	24	0,28	1,19
		Rda	24	2,45	35	34	23,47	2,35	60,5	0,28	0,48
Las Palmas	el pan	Colúvio	15,5	1,58	35	25	20,00	2,00	24	0,28	1,19
		Rda	21	2,15	40	35	21,79	2,18	25,7	0,28	1,50
Las Juntas	alao	Colúvio	21	2,15	35	33	23,00	2,30	31	0,28	1,12
		Rda	24	2,45	35	37	28,48	2,85	25,7	0,28	1,52
Média Alao-Paute		Colúvio	19,67	2,01	51,67	34,33	23,67	2,37	32,33	0,28	1,20
		Rda	25,33	2,59	178,33	36,33	26,60	2,66	30,47	0,28	1,74
Média El Pan		Colúvio	18,95	1,94	38,33	23,83	15,33	1,53	21,00	0,28	1,60
		Rda	23,83	2,43	106,67	32,83	27,67	2,77	31,42	0,28	1,55

### 5.2.3.2 Análise 17

A Tabela 5-17 mostra os resultados de FS para a análise que considera os parâmetros c e  $\phi$  reais, coeficiente sísmico igual a 0,28g e grau de saturação dos terrenos em 50%.

Para caso de igual aceleração sísmica, como é o caso da análise 16, o aumento da saturação de 10% para 50% reduziu o FS de 7,9% a 19,29%.

Em relação à análise 11, de comportamento estático, o FS mostrou-se de 4,49% a 10,90% inferior em função da aceleração sísmica.

**Tabela 5-17.** Fator de Segurança das áreas instáveis para análise 17.

Localidade	Unidade litológica	Material	peso específico ( $\gamma$ ) kN/m <sup>3</sup>	massa específica ( $\delta$ ) g/cm <sup>3</sup>	Coesão real (c) kPa	Ângulo de atrito interno real ( $\phi$ )	Profundidade do plano de ruptura em colúvio e Z (m)	Espessura de material saturado $h_2 = Z/2$	Ângulo crítico i (°)	Coefficiente sísmico superestimado $K_h$ (m/s <sup>2</sup> )	FS Estudo 17
Osomache Norte	alao	Colúvio	19	1,94	60	35	20,00	10,00	33	0,28	1,07
		Rda	26	2,66	250	36	20,88	10,44	37,5	0,28	1,64
Osomache	alao	Colúvio	19	1,94	60	35	28,00	14,00	33	0,28	0,98
		Rda	26	2,66	250	36	30,44	15,22	28,2	0,28	1,74
Santa Rita	alao e el pan	Colúvio	19	1,94	60	35	20,00	10,00	27	0,28	1,31
		Rda	26	2,66	250	36	31,25	15,63	25,5	0,28	1,89
Tubán	el pan	Colúvio	19,8	2,02	40	25	10,00	5,00	16	0,28	1,79
		Rda	24	2,45	100	30	50,85	25,43	25,5	0,28	1,09
Osoyacu	el pan	Colúvio	19,8	2,02	40	25	15,00	7,50	14	0,28	1,76
		Rda	24	2,45	100	30	22,73	11,37	44,8	0,28	0,79
Nuñurcu	el pan	Colúvio	19,8	2,02	40	20	5,00	2,50	23	0,28	1,64
		Rda	24	2,45	100	33	5,00	2,50	36,2	0,28	2,34
Llamacón	el pan	Colúvio	19	1,94	35	28	25,00	12,50	18	0,28	1,32
		Rda	26	2,66	200	36	40,45	20,23	25,7	0,28	1,59
Chalacay	el pan	Colúvio	19,8	2,02	40	20	17,00	8,50	31	0,28	0,68
		Rda	24	2,45	100	33	25,20	12,60	30,6	0,28	1,17
Quebrada Honda	alao e el pan	Colúvio	21	2,15	29	27	20,00	10,00	24	0,28	0,98
		Rda	24	2,45	35	34	23,47	11,74	60,5	0,28	0,42
Las Palmas	el pan	Colúvio	15,5	1,58	35	25	20,00	10,00	24	0,28	0,94
		Rda	21	2,15	40	35	21,79	10,90	25,7	0,28	1,24
Las Juntas	alao	Colúvio	21	2,15	35	33	23,00	11,50	31	0,28	0,92
		Rda	24	2,45	35	37	28,48	14,24	25,7	0,28	1,27
Média Alao-Paute		Colúvio	19,67	2,01	51,67	34,33	23,67	11,83	32,33	0,28	0,99
		Rda	25,33	2,59	178,33	36,33	26,60	13,30	30,47	0,28	1,55
Média El Pan		Colúvio	18,95	1,94	38,33	23,83	15,33	7,67	21,00	0,28	1,35
		Rda	23,83	2,43	106,67	32,83	27,67	13,84	31,42	0,28	1,37

### 5.2.3.3 Análise 18

A Tabela 5-18 mostra os resultados de FS para a análise que considera os parâmetros c e  $\phi$  reais, coeficiente sísmico igual a 0,28g e grau de saturação dos terrenos em 100%.

A influência da água na redução da estabilidade é observada comparando os resultados de FS desta análise com os da análise 16. Nota-se uma redução do FS de 12,90% a 47,87%.

Comparando os resultados com os de uma mesma condição de saturação, porém sem sismo (caso da análise 12), nota-se que a aceleração sísmica de 0,28g reduziu o FS entre 4,55% a 11,09%.

**Tabela 5-18.** Fator de Segurança das áreas instáveis para análise 18.

Localidade	Unidade litológica	Material	peso específico ( $\gamma$ ) kN/m <sup>3</sup>	massa específica ( $\delta$ ) g/cm <sup>3</sup>	Coesão real (c) kPa	Ângulo de atrito interno ( $\phi$ )	Profundidade do plano de ruptura em colúvio e Z (m)	Espessura de material saturado $h_2 = Z$	Ângulo crítico $i$ (°)	Coefficiente sísmico de projeto $K_h$ (m/s <sup>2</sup> )	FS Estudo 18
Osomache Norte	alao	Colúvio	19	1,94	60	35	20,00	20,00	33	0,28	0,80
		Rda	26	2,66	250	36	20,88	20,88	37,5	0,28	1,46
Osomache	alao	Colúvio	19	1,94	60	35	28,00	28,00	33	0,28	0,71
		Rda	26	2,66	250	36	30,44	30,44	28,2	0,28	1,49
Santa Rita	alao e el pan	Colúvio	19	1,94	60	35	20,00	20,00	27	0,28	0,97
		Rda	26	2,66	250	36	31,25	31,25	25,5	0,28	1,61
Tubán	el pan	Colúvio	19,8	2,02	40	25	10,00	10,00	16	0,28	1,41
		Rda	24	2,45	100	30	50,85	50,85	25,5	0,28	0,85
Osoyacu	el pan	Colúvio	19,8	2,02	40	25	15,00	15,00	14	0,28	1,33
		Rda	24	2,45	100	30	22,73	22,73	44,8	0,28	0,67
Nuñurcu	el pan	Colúvio	19,8	2,02	40	20	5,00	5,00	23	0,28	1,44
		Rda	24	2,45	100	33	5,00	5,00	36,2	0,28	2,16
Llamacón	el pan	Colúvio	19	1,94	35	28	25,00	25,00	18	0,28	0,93
		Rda	26	2,66	200	36	40,45	40,45	25,7	0,28	1,32
Chalacay	el pan	Colúvio	19,8	2,02	40	20	17,00	17,00	31	0,28	0,53
		Rda	24	2,45	100	33	25,20	25,20	30,6	0,28	0,95
Quebrada Honda	alao e el pan	Colúvio	21	2,15	29	27	20,00	20,00	24	0,28	0,72
		Rda	24	2,45	35	34	23,47	23,47	60,5	0,28	0,34
Las Palmas	el pan	Colúvio	15,5	1,58	35	25	20,00	20,00	24	0,28	0,62
		Rda	21	2,15	40	35	21,79	21,79	25,7	0,28	0,91
Las Juntas	alao	Colúvio	21	2,15	35	33	23,00	23,00	31	0,28	0,68
		Rda	24	2,45	35	37	28,48	28,48	25,7	0,28	0,97
Média Alao-Paute		Colúvio	19,67	2,01	51,67	34,33	23,67	23,67	32,33	0,28	0,73
		Rda	25,33	2,59	178,33	36,33	26,60	26,60	30,47	0,28	1,31
Média El Pan		Colúvio	18,95	1,94	38,33	23,83	15,33	15,33	21,00	0,28	1,05
		Rda	23,83	2,43	106,67	32,83	27,67	27,67	31,42	0,28	1,14

#### 5.2.4 RESUMO COMPARATIVO DOS FATORES DE SEGURANÇA

Para fins de comparação dos resultados de Fator de Segurança para cada hipótese simulada, são apresentadas duas tabelas a seguir. A primeira (Tabela 5-19) resume os valores determinados com parâmetros geotécnicos retroanalizados, considerando a coesão zero. A segunda (Tabela 5-20) demonstra os resultados de FS calculado com base em parâmetros geotécnicos reais.

As colunas estão agrupadas em ordem crescente de saturação (10%, 50% e 100%), e dentro destes grupos os resultados obedecem ao critério crescente de ação sísmica (0; 0,14m/s<sup>2</sup> e 0,28m/s<sup>2</sup>).

É notório que o Fator de Segurança decresce com o aumento de água e aumento do coeficiente sísmico. Porém, entre estes dois elementos, a água mostra-se o elemento que mais potencializa a instabilidade, e a ação combinada com terremotos agrava o problema.



**Tabela 5-19.** Tabela-resumo dos Fatores de Segurança com base em parâmetros geotécnicos retroanalizados.

			FS com parâmetros gotécnicos retroanalizados: coesão zero e $\phi$ retroanalizado								
			SEM SISMO			SISMO DE PROJETO = 0,14g			SISMO SUPERESTIMADO = 0,28g		
			10% de água	50% de água	100% de água	10% de água	50% de água	100% de água	10% de água	50% de água	100% de água
Zona Instável	Litologia	Material	Análise 1	Análise 2	Análise 3	Análise 4	Análise 5	Análise 6	Análise 7	Análise 8	Análise 9
Osomache Norte	alao	Colúvio	0,95	0,92	0,76	0,92	0,89	0,72	0,89	0,86	0,70
		Rda	0,95	0,94	0,89	0,92	0,91	0,86	0,90	0,88	0,83
Osomache	alao	Colúvio	0,95	0,92	0,76	0,92	0,89	0,72	0,89	0,86	0,70
		Rda	0,95	0,94	0,89	0,92	0,91	0,86	0,89	0,88	0,83
Santa Rita	alao e el pan	Colúvio	0,95	0,90	0,75	0,91	0,87	0,72	0,88	0,84	0,69
		Rda	0,95	0,94	0,89	0,92	0,90	0,86	0,89	0,87	0,82
Tubán	el pan	Colúvio	0,95	0,90	0,77	0,90	0,85	0,73	0,86	0,81	0,69
		Rda	0,95	0,94	0,88	0,92	0,90	0,85	0,89	0,87	0,81
Osoyacu	el pan	Colúvio	0,95	0,92	0,80	0,89	0,86	0,75	0,85	0,81	0,71
		Rda	0,95	0,94	0,88	0,92	0,91	0,85	0,90	0,88	0,81
Nuñurcu	el pan	Colúvio	0,95	0,90	0,79	0,91	0,86	0,75	0,88	0,83	0,72
		Rda	0,95	0,94	0,88	0,92	0,91	0,85	0,90	0,88	0,82
Llamacón	el pan	Colúvio	0,95	0,92	0,71	0,90	0,87	0,67	0,86	0,83	0,64
		Rda	0,95	0,94	0,90	0,92	0,91	0,86	0,89	0,87	0,83
Chalacay	el pan	Colúvio	0,95	0,90	0,80	0,92	0,87	0,76	0,89	0,84	0,73
		Rda	0,95	0,94	0,88	0,92	0,91	0,85	0,89	0,87	0,82
Quebrada Honda	alao e el pan	Colúvio	0,95	0,95	0,85	0,92	0,91	0,82	0,88	0,88	0,78
		Rda	0,95	0,94	0,88	0,92	0,90	0,84	0,89	0,87	0,79
Las Palmas	el pan	Colúvio	0,94	0,91	0,83	0,90	0,88	0,79	0,87	0,84	0,75
		Rda	0,95	0,93	0,86	0,92	0,90	0,82	0,89	0,86	0,79
Las Juntas	alao	Colúvio	0,95	0,92	0,84	0,92	0,89	0,81	0,89	0,86	0,78
		Rda	0,95	0,94	0,88	0,92	0,90	0,85	0,89	0,87	0,81
Média Alao-Paute		Colúvio	0,95	0,92	0,78	0,92	0,89	0,75	0,89	0,86	0,72
		Rda	0,95	0,94	0,89	0,92	0,91	0,86	0,89	0,88	0,82
Média El Pan		Colúvio	0,95	0,91	0,78	0,90	0,87	0,74	0,87	0,83	0,71
		Rda	0,95	0,94	0,88	0,92	0,90	0,85	0,89	0,87	0,81

**Tabela 5-20.** Tabela-resumo dos Fatores de Segurança com parâmetros geotécnicos reais.

			FS com parâmetros geotécnicos c e $\phi$ reais								
			SEM SISMO			SISMO DE PROJETO = 0,14g			SISMO SUPERESTIMADO = 0,28g		
			10% de água	50% de água	100% de água	10% de água	50% de água	100% de água	10% de água	50% de água	100% de água
Zona Instável	Litologia	Material	Análise 10	Análise 11	Análise 12	Análise 13	Análise 14	Análise 15	Análise 16	Análise 17	Análise 18
Osomache Norte	alao	Colúvio	1,37	1,14	0,86	1,33	1,11	0,83	1,29	1,07	0,80
		Rda	1,86	1,72	1,54	1,82	1,68	1,50	1,78	1,64	1,46
Osomache	alao	Colúvio	1,27	1,04	0,76	1,23	1,01	0,73	1,20	0,98	0,71
		Rda	2,06	1,85	1,59	2,00	1,79	1,54	1,94	1,74	1,49
Santa Rita	alao e el pan	Colúvio	1,69	1,40	1,04	1,64	1,35	1,00	1,58	1,31	0,97
		Rda	2,26	2,02	1,73	2,18	1,95	1,67	2,11	1,89	1,61
Tubán	el pan	Colúvio	2,31	1,98	1,57	2,19	1,88	1,49	2,09	1,79	1,41
		Rda	1,37	1,17	0,92	1,32	1,13	0,88	1,28	1,09	0,85
Osoyacu	el pan	Colúvio	2,35	1,97	1,50	2,22	1,86	1,41	2,10	1,76	1,33
		Rda	0,92	0,83	0,71	0,90	0,81	0,69	0,88	0,79	0,67
Nuñurcu	el pan	Colúvio	1,94	1,76	1,55	1,87	1,70	1,49	1,81	1,64	1,44
		Rda	2,60	2,45	2,27	2,54	2,39	2,21	2,48	2,34	2,16
Llamacón	el pan	Colúvio	1,80	1,46	1,03	1,72	1,39	0,98	1,64	1,32	0,93
		Rda	1,94	1,71	1,42	1,87	1,65	1,36	1,81	1,59	1,32
Chalacay	el pan	Colúvio	0,84	0,72	0,57	0,82	0,70	0,55	0,80	0,68	0,53
		Rda	1,43	1,25	1,02	1,39	1,21	0,98	1,35	1,17	0,95
Quebrada Honda	alao e el pan	Colúvio	1,28	1,06	0,79	1,23	1,02	0,75	1,19	0,98	0,72
		Rda	0,51	0,45	0,37	0,50	0,43	0,36	0,48	0,42	0,34
Las Palmas	el pan	Colúvio	1,28	1,01	0,68	1,24	0,98	0,65	1,19	0,94	0,62
		Rda	1,61	1,33	0,99	1,55	1,28	0,95	1,50	1,24	0,91
Las Juntas	alao	Colúvio	1,19	0,99	0,73	1,16	0,96	0,70	1,12	0,92	0,68
		Rda	1,63	1,37	1,04	1,57	1,32	1,00	1,52	1,27	0,97
Média Alao-Paute		Colúvio	1,28	1,06	0,78	1,24	1,02	0,75	1,20	0,99	0,73
		Rda	1,85	1,65	1,39	1,80	1,60	1,35	1,74	1,55	1,31
Média El Pan		Colúvio	1,75	1,48	1,15	1,68	1,42	1,09	1,60	1,35	1,05
		Rda	1,65	1,46	1,22	1,60	1,41	1,18	1,55	1,37	1,14

### 5.3 DETERMINAÇÃO DO FATOR DE SEGURANÇA PARA AS DEMAIS ÁREAS

Uma vez determinados os Fatores de Segurança para as zonas de alta periculosidade, calculou-se este coeficiente para as demais áreas, constituídas não mais por grandes depósitos coluvionares instabilizados, mas sim por uma espessa camada de material de rocha descomprimida e alterada coberta por solo residual pouco expressivo.

A análise de Fator de Segurança das zonas instáveis, além de resultar na média dos atributos de solo coluvionar correspondente às unidades litológicas Alao-Paute e El Pan, também apresentou tais valores para o horizonte de rocha descomprimida e alterada. Com isto, obteve-se valores de resistência ( $c$  e  $\phi$ ) médio das rochas descomprimidas e alteradas, bem como a média do peso e da massa específica natural, média e saturada dos materiais correspondentes ( $\gamma_{nat}$  e  $\rho_{nat}$ ;  $\gamma_{med}$  e  $\rho_{med}$ ;  $\gamma_{sat}$  e  $\rho_{sat}$ ), e a profundidade média do plano de ruptura em rocha ( $Z_{col}$  e  $Z_{Rda}$ ). Tanto os valores de  $c$  e  $\phi$  quanto as profundidades dos planos de ruptura em horizonte de rocha ( $Rda$ ), para fins de cálculos da área como um todo, referem-se às profundidades médias das unidades litológicas.

No tocante aos ângulos críticos das demais áreas, consideraram-se as inclinações extraídas de fotointerpretação.

Para as zonas de alta periculosidade, os cálculos de FS puderam ser efetuados em planilha Excel por se tratar-se de análises aplicadas ao longo do maior eixo de escorregamento de cada uma delas. Porém, para as demais regiões este cálculo seria impraticável. Para isto utilizou-se técnicas de geoprocessamento utilizando o software ArcMap.

#### 5.3.1 CÁLCULOS DE FATOR DE SEGURANÇA EM AMBIENTE GIS

Como *GIS* (*Geographic Information System*), reproduzo a definição a publicada pela ESRI (*Environmental Systems Research Institute, Inc.*) produtora do *Esri® ArcMap®*:

“*GIS* é um sistema de computador (*hardware*), *software*, dados geográficos e pessoais, desenhado para, de forma eficiente capturar, armazenar, atualizar, manipular,

analisar e apresentar todos os tipos de informações referenciadas geograficamente.”

Em um ambiente *GIS* é possível correlacionar diferentes tipologias georreferenciadas, visualizar o produto final e vincular a imagem produzida a um banco de dados com as informações pertinentes a cada tipologia mesclada.

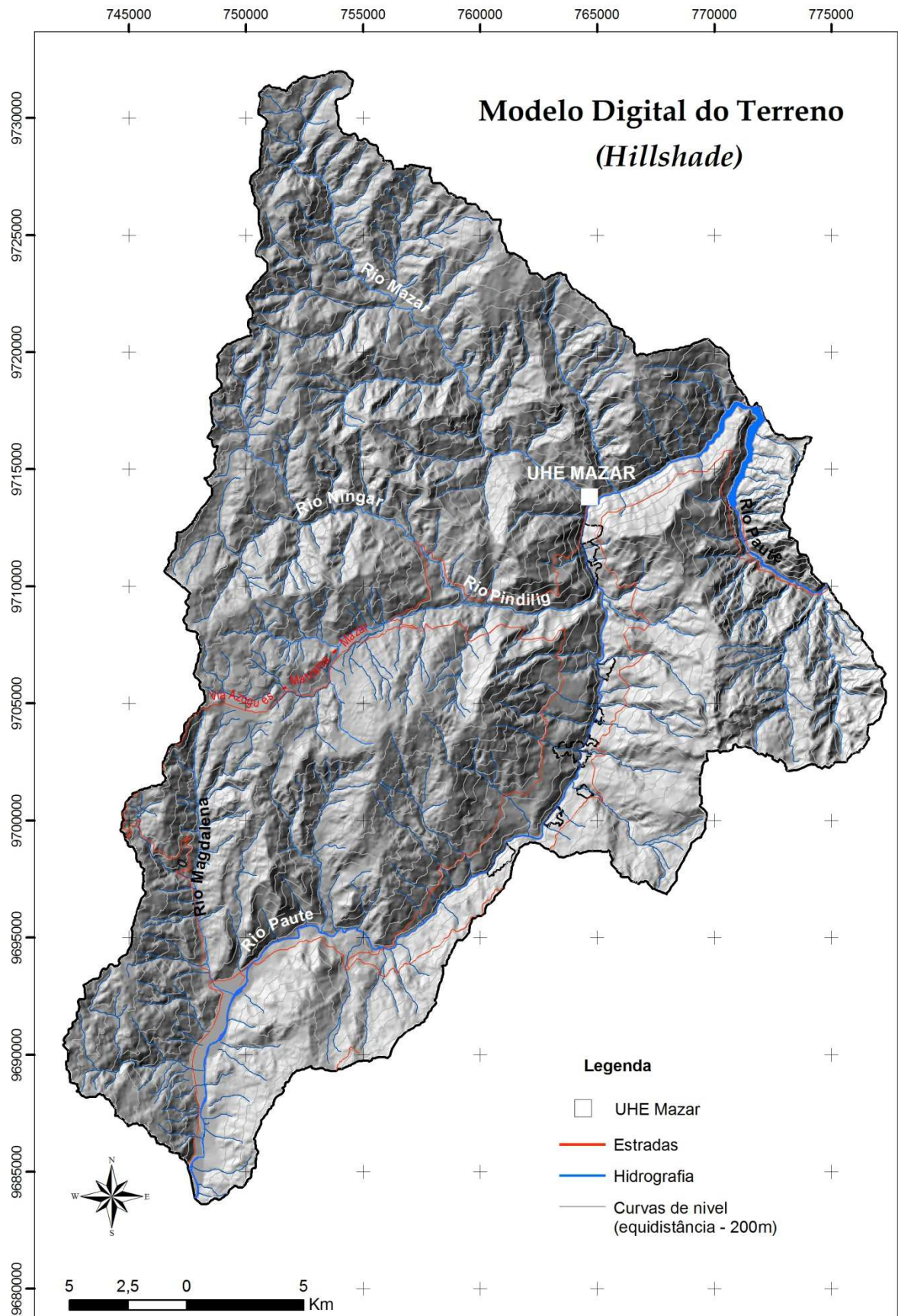
Os valores de Fator de Segurança foram processados em ambiente *GIS* através do software *Esri® ArcMap®*, onde criou-se um banco de dados com todas as informações pertinentes para o cálculo de Fator de Segurança de toda a área limitada para este estudo.

As cartas base utilizadas para comporem os mapas foram as de geologia e declividade, ambas tratadas como *Grids* (imagens *raster* georreferenciadas). Da carta geológica tem-se a unidade litológica correspondente a cada pixel contido no espaço. Da mesma forma, a carta de declividade informa o ângulo de inclinação do terreno pontualmente. Ambas são imprescindíveis para aplicar os cálculos de Fator de Segurança. Utilizou-se o modelo digital do terreno para gerar mapa de declividade e reclassificá-lo em intervalos de inclinação, gerando polígonos nos limites apresentados na Tabela 5-21.

**Tabela 5-21.** Classes representativas de declividades agrupadas em polígonos.

Inclinação		Classe
%	(°)	
< 5%	0 – 2,85°	1
5% – 10%	2,85° – 5,70°	2
10% – 15%	5,70° – 8,51°	3
15% – 20%	8,51° – 11,30°	4
20% – 30%	11,30° – 16,70°	5
30% – 40%	16,70° – 21,80°	6
40% – 60%	21,80° – 30,95°	7
> 60%	> 30,95°	8

O critério relacionado ao grau de saturação do meio e à ação sísmica foi igual aos considerados para as zonas instáveis, tanto para solo coluvionar quanto para rocha descomprimida e alterada, com a ressalva de que para as áreas fora das zonas instáveis os parâmetros utilizados foram as médias de suas respectivas unidades litológicas.



**Figura 5-2.** Modelo digital do terreno.



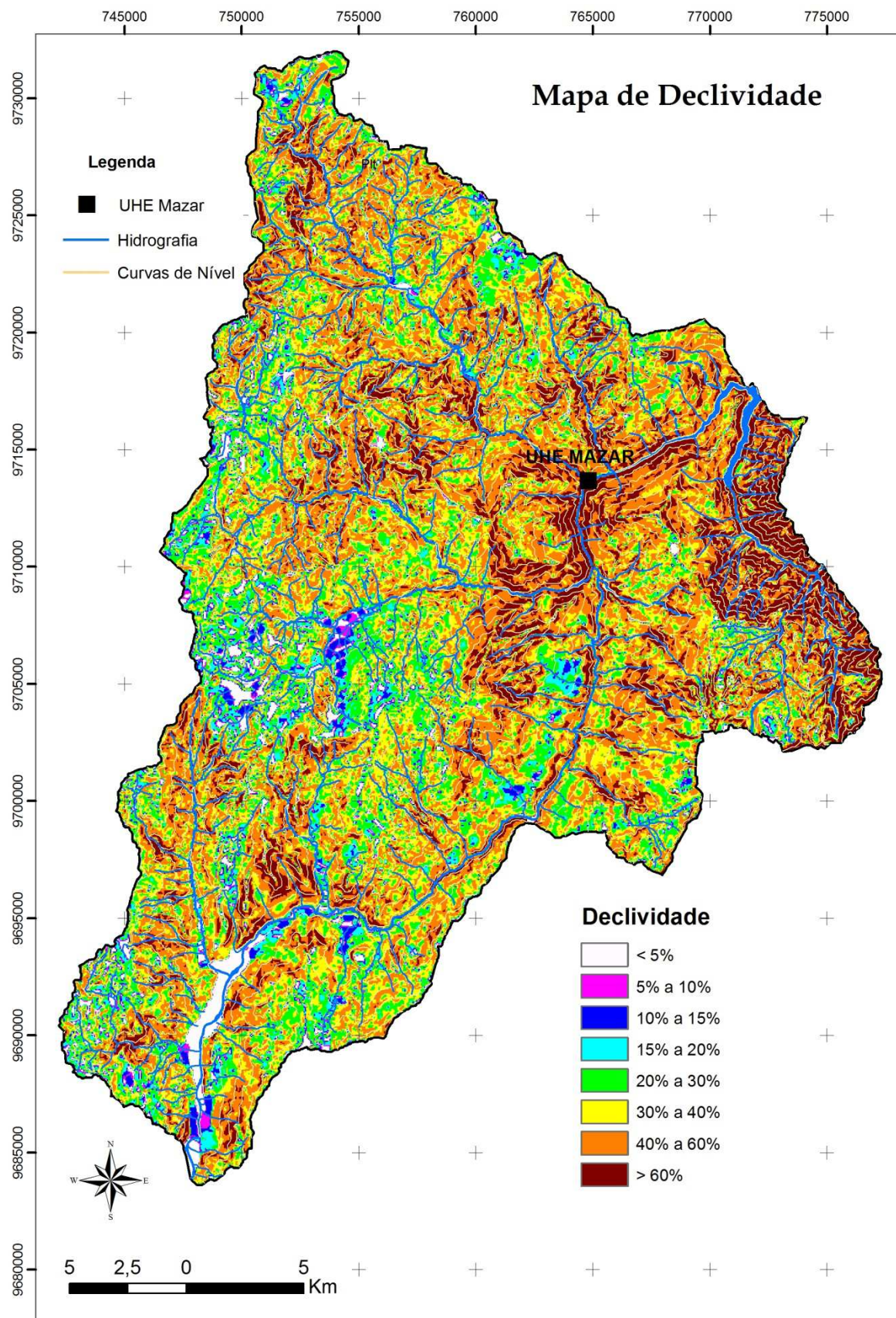


Figura 5-3. Mapa de declividade.

### 5.3.2 ESPACIALIZAÇÃO DE FATOR DE SEGURANÇA

A espacialização dos Fatores de Segurança ao longo do reservatório da hidroelétrica Mazar foi elaborada para os casos expostos no Quadro 5-4, para fins de análise das condições dinâmicas estudadas, nos graus de saturação máximo e mínimo.

**Quadro 5-4.** Análises de Fator de Segurança espacializadas: parâmetros retroanalizados.

Análise	Critérios analisados para determinação do Fator de Segurança				Figura
	Condição sísmica	coesão	$\phi$	m	
4	Sismo de projeto	0,14g	0	retroanalizado	Figura 5-4
6		0,14g			Figura 5-5
7	Sismo superestimado	0,28g			Figura 5-6
9		0,28g			Figura 5-7

Além destes, elaborou-se mapas de FS para as análises 14 e 17 que consideram os valores reais de  $c$  e  $\phi$  em situação de saturação média, no intuito de visualizar a contribuição destes atributos geotécnicos na estabilidade das encostas para a aceleração sísmica de projeto (0,14g) e a superestimada (0,28g).

**Quadro 5-5.** Análises de Fator de Segurança espacializadas: parâmetros reais.

Análise	Critérios analisados para determinação do Fator de Segurança				Figura
	Condição sísmica	coesão	$\phi$	m	
14	Sismo de projeto	0,14g	real	real	Figura 5-8
17	Sismo superestimado	0,28g			Figura 5-9

Os cálculos foram gerados a partir de banco de dados elaborado em ArcMap e os resultados de Fator de Segurança foram agrupados, para visualização final, em classes cujos intervalos estão na Tabela 5-22.

**Tabela 5-22.** Classes de Fator de Segurança agrupadas em polígonos.

FS	Classe
$FS < 1$	1
$1 \leq FS < 1,50$	2
$1,5 \leq FS < 2$	3
$2 \leq FS < 5$	4
$FS \geq 5$	5

Os mapas resultantes estão nas figuras a seguir.



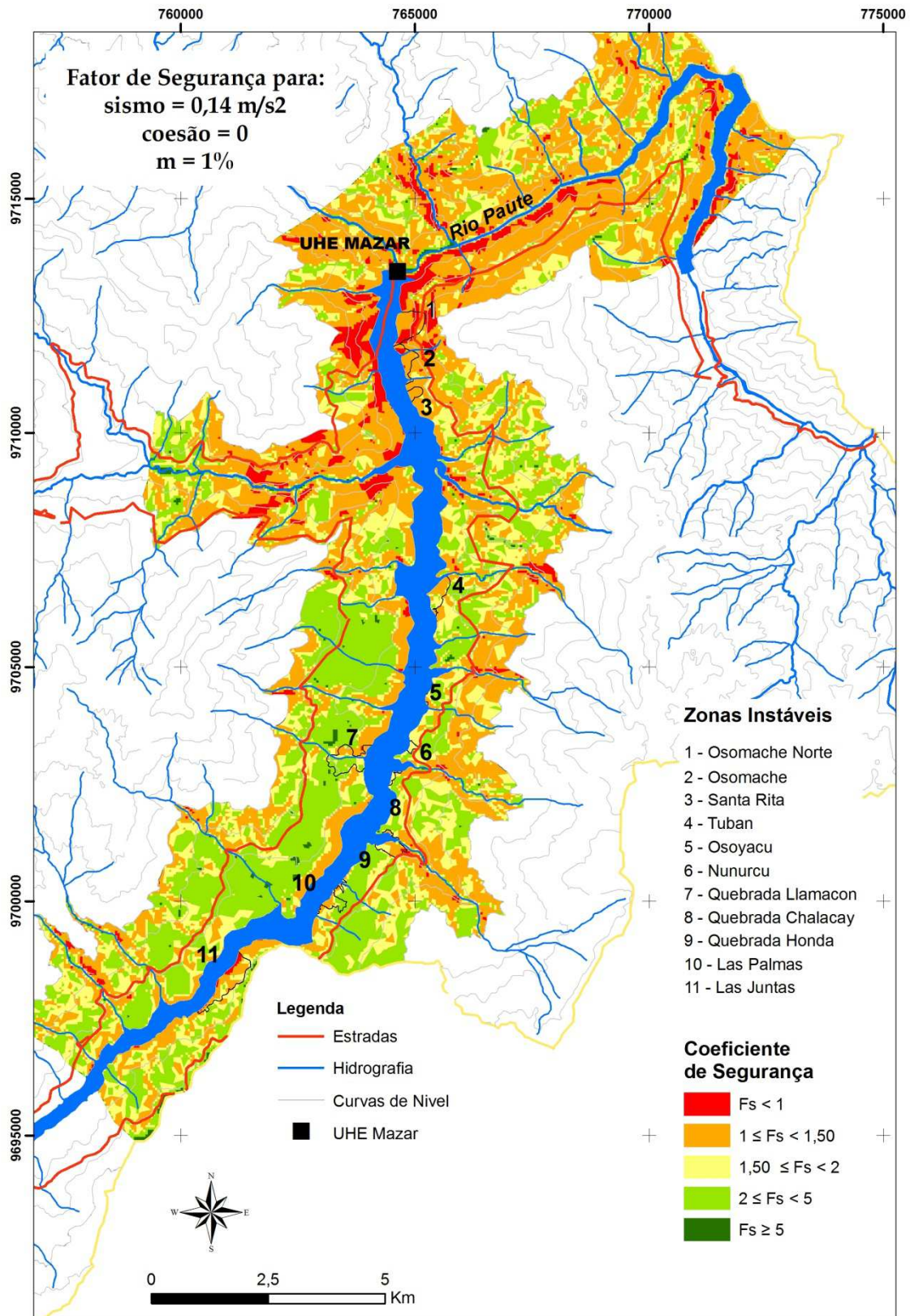


Figura 5-4. Espacialização de Fator de Segurança para Análise 4.

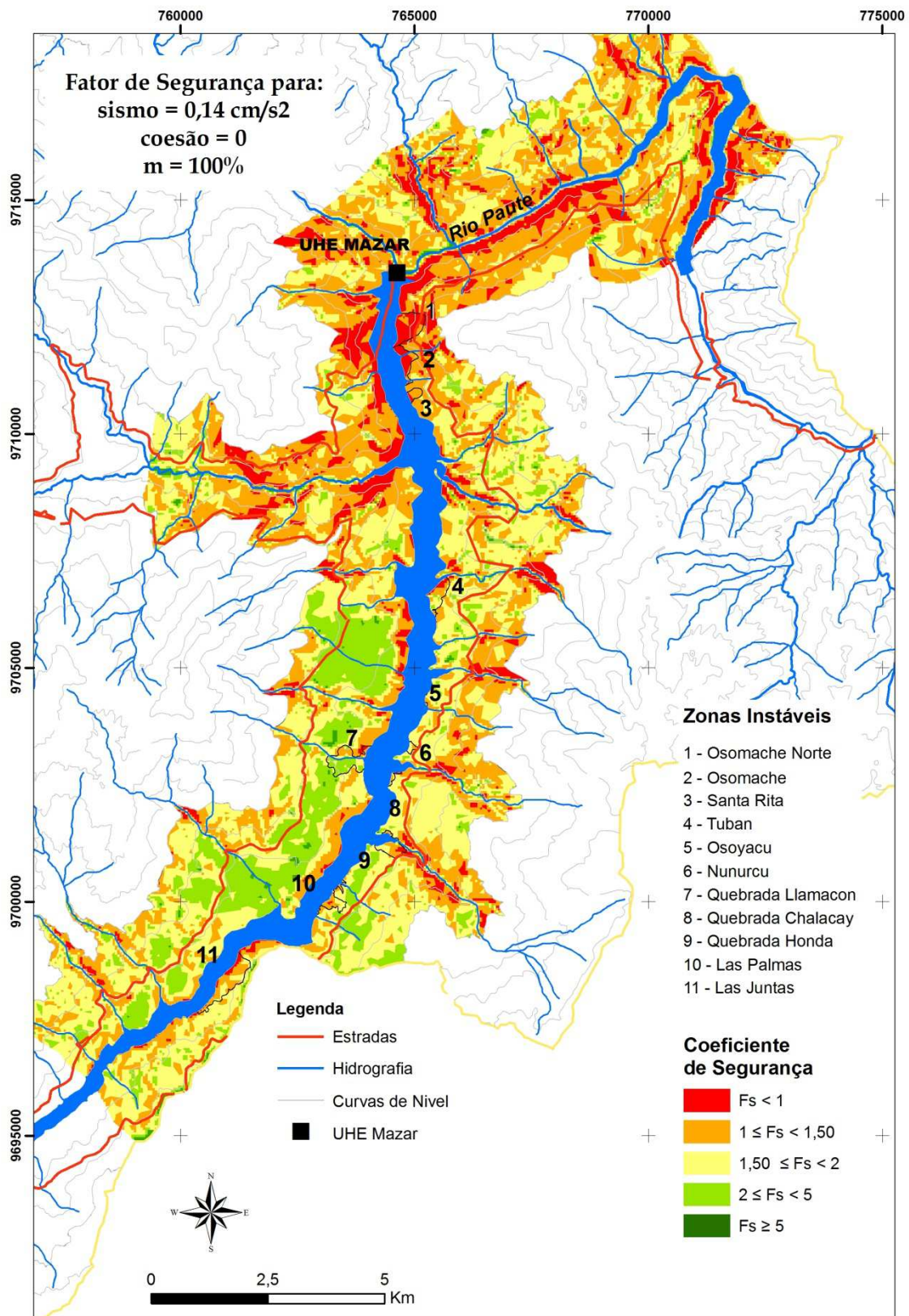


Figura 5-5. Espacialização de Fator de Segurança para análise 6.



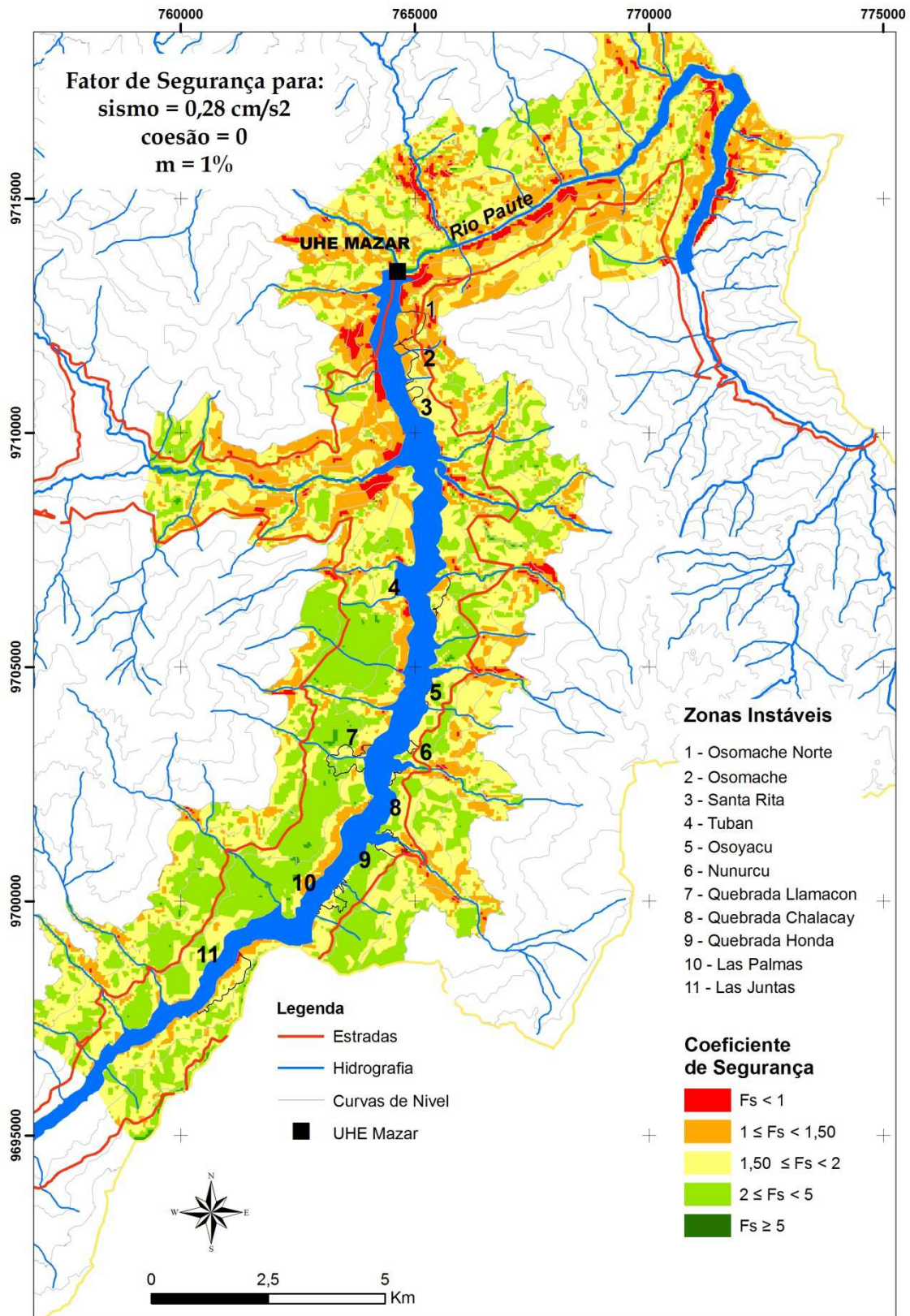


Figura 5-6. Espacialização de Fator de Segurança para análise 7.

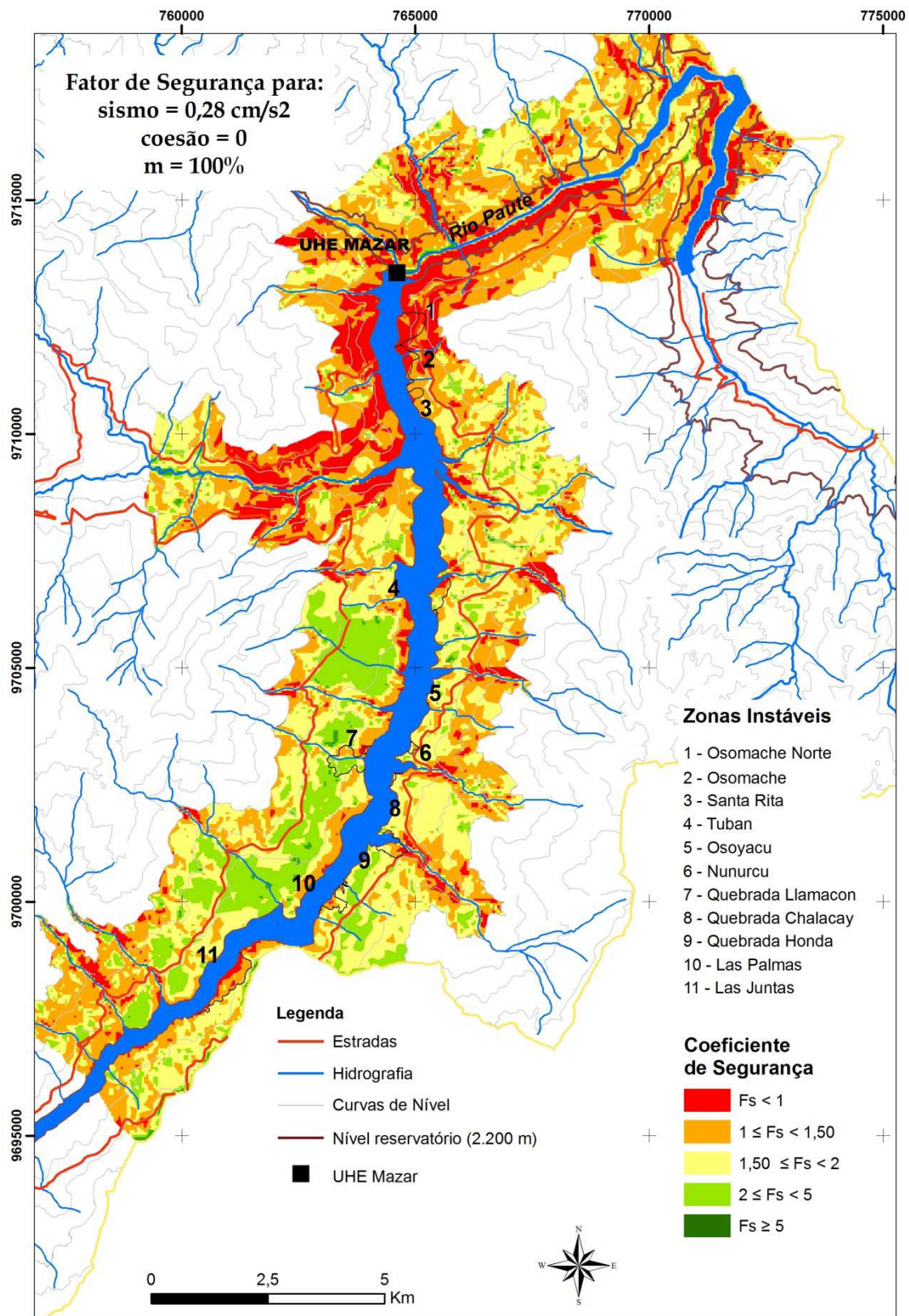


Figura 5-7. Espacialização de Fator de Segurança para análise 9.



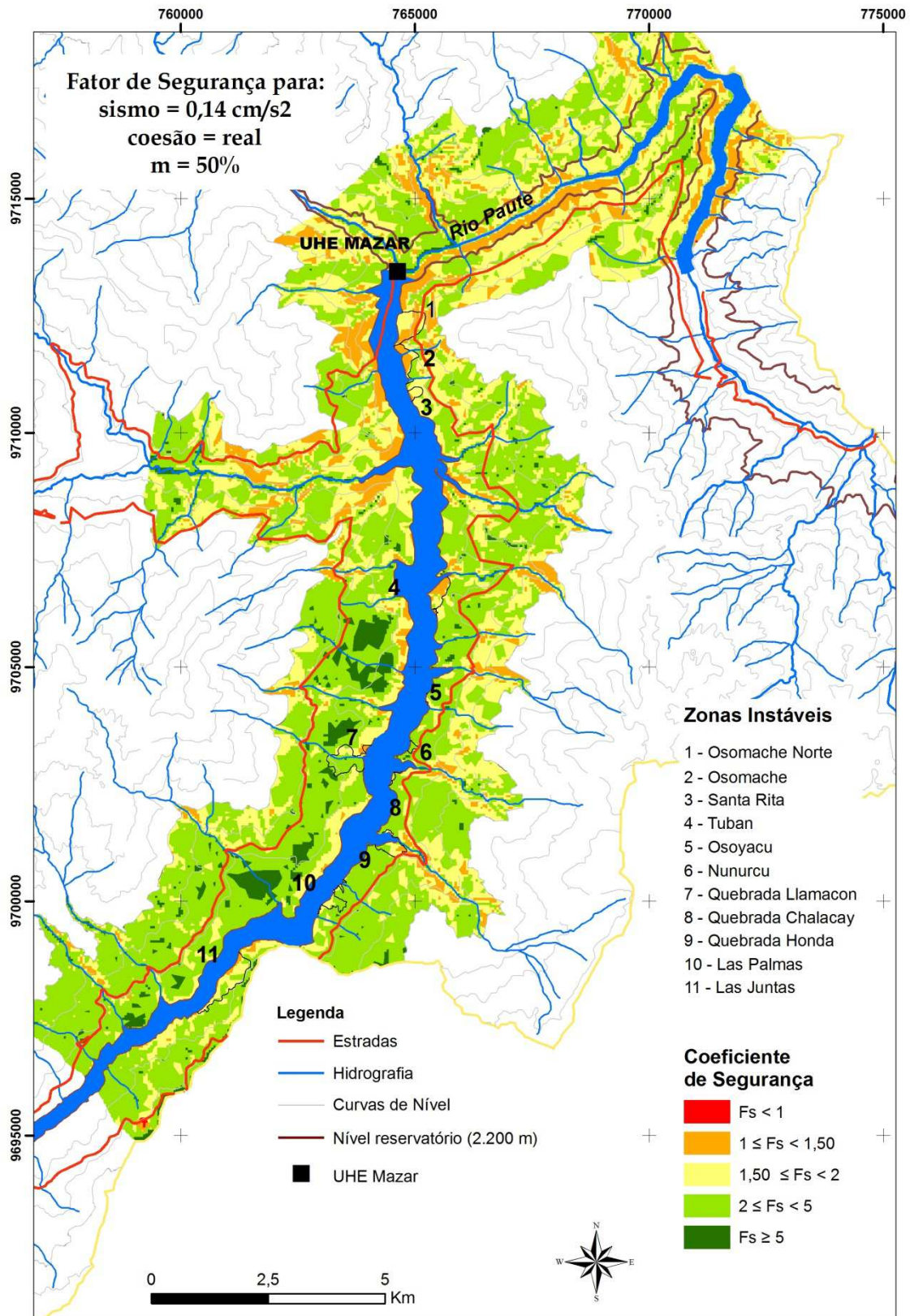


Figura 5-8. Espacialização de Fator de Segurança para análise 14.

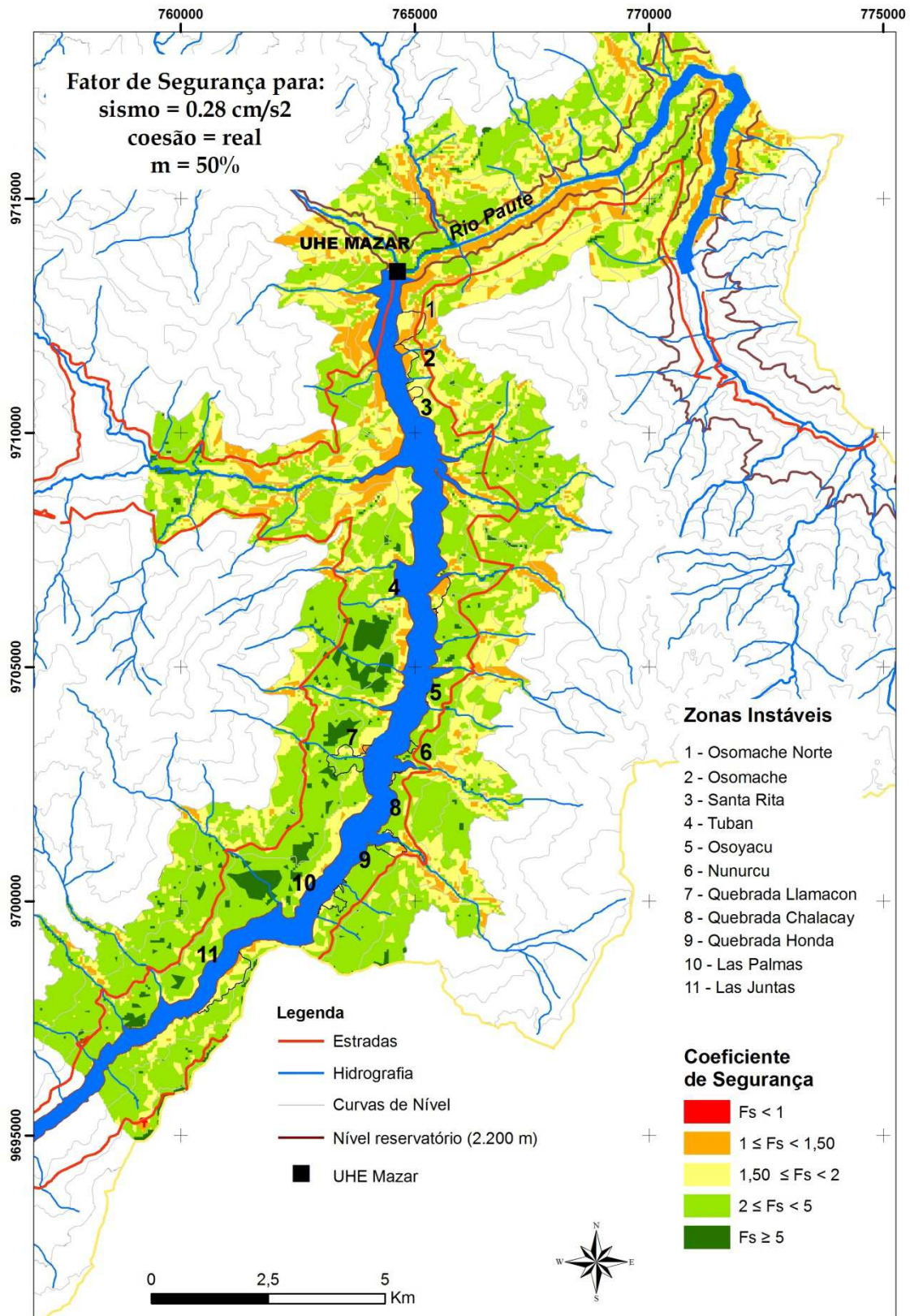


Figura 5-9. Espacialização de Fator de Segurança para análise 17.

### 5.3.3 CONSIDERAÇÃO SOBRE OS MAPAS DE FATOR DE SEGURANÇA

A sensível diferença visual entre os mapas das análises 4 e 7, e 6 e 9, ocorre porque os valores resultantes de FS, apesar de reduzirem de uma situação para outra por conta de aceleração sísmica, mantêm-se no mesmo intervalo de classe adotado. O mesmo ocorre, de forma mais nítida, entre os mapas das análises 14 e 17.

Se o número de classes fosse aumentado, considerando intervalos menores, seria mais nítida esta percepção, como demonstrado nas tabelas abaixo.

A Tabela 5-23 demonstra a área abrangida por cada classe de Fator de Segurança nos mapas realizados para as análises 4, 6, 7 e 9.

**Tabela 5-23.** Áreas afetadas por cada intervalo de classe de Fator de Segurança.

		SISMO DE PROJETO		SISMO SUPERESTIMADO	
		Análise			
		4	6	7	9
		Grau de saturação			
Classe de FS		10%	100%	10%	100%
1	FS<1	1,4	5,9	1,5	6,3
2	1≤FS<1,50	28,1	41,8	28	41,4
3	1,5≤FS<2	17,7	14,2	17,7	14,2
4	2≤FS<5	28,9	14,4	28,9	15,5
5	FS≥5	2,1	1,9	2,1	0,8
Área total		78 (km²)			

A Tabela 5-24 discrimina as mesmas áreas, porém em mais intervalos de classes.

**Tabela 5-24.** Incremento de intervalo de classe de Fator de Segurança.

		SISMO DE PROJETO		SISMO SUPERESTIMADO	
		Análise			
		4	6	7	9
Classe de FS		Grau de saturação			
		10%	100%	10%	100%
1	FS<1	1,4	5,9	1,5	6,3
2	1≤FS<1,05	3,4	8,3	3,4	7,9
3	1,05≤FS<1,1	8,2	1,2	8,6	14,1
4	1,1≤FS<1,5	16,5	32,3	16	19,4
5	1,5≤FS<2	17,7	14,2	17,7	14,2
6	2≤FS<5	28,9	14,4	28,9	15,5
7	FS≥5	2,1	1,9	2,1	0,8
Área total		78 (km <sup>2</sup> )			



Nota-se que a Classe 2 da Tabela 5-23 abrange os intervalos de classes 2, 3 e 4 da Tabela 5-24, e isto tem conotação visual distinta. Para efeitos de análise, quanto mais classes estipuladas, e de intervalos pequenos, maiores os contrastes visuais.

Entre os mapas das análises 4 e 6, e 7 e 9 é possível identificar visualmente a diminuição da estabilidade em locais onde o FS reduziu a ponto de rebaixar de classe, atestando a contribuição da água na instabilidade.

Os mapas gerados a partir de parâmetros retroanalizados, com coesão zero, tornam evidentes áreas instáveis como nas zonas de Osomache Norte, Osomache e Santa Rita, todas próximas à barragem da hidroelétrica Mazar. Esta situação em campo não é real em função da presença de ângulo de atrito. No entanto, se observadas as mesmas regiões nos mapas gerados para atributos geotécnicos reais, elas estariam em uma classe de FS próxima à unidade, correspondendo a áreas de risco para a obra civil. Estudos anteriores feitos pelo projeto já haviam previsto estas áreas de risco, e foram comprovadas durante a fase executiva da obra. As precauções tomadas podem ser vislumbradas nas fotos a seguir.



**Figura 5-10.** Tratamento para estabilizar talude do vertedouro da UHE Mazar. (fotos de 19/07/2012)

*Fotos: acervo CGM*

Os pontos brancos nas fotos do vertedouro são placas de proteção das cabeças das ancoragens. Para estabilização do talude do vertedouro de 350 metros de altura, foram utilizados 25.000 ancoragens de 12 metros de comprimento cada, o que corresponde a 300.000 metros lineares aplicados.

Se observarmos o incremento de água no sistema, dentro das diferentes situações sísmicas, é notório observar que as áreas mais instáveis aumentam à medida que o grau de saturação aumenta. Isto ocorre nas classes de FS 1 e 2. As classes superiores à classe 3, onde o FS é maior que 1,05, demonstram uma redução de área à medida que aumenta o grau de saturação do sistema.

Esta relação de aumento de áreas instáveis para classes inferiores a 2, e redução de área nas demais classes, à medida que aumentam as condições de saturação e coeficiente sísmico é natural. Estas duas variáveis impõem instabilidade ao sistema e, por consequência, observam-se locais com maior potencial ao escorregamento quanto maior a quantidade de água e aceleração sísmica admitida.

Assim como nos cálculos de Fator de Segurança de cada zona instável, tanto a Tabela 5-23 quanto os mapas de FS apresentados corroboram com o fato de que, mais que o coeficiente sísmico, a água ainda é o elemento de maior contribuição na instabilidade das encostas.

# DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

## 6.1 CARACTERÍSTICAS DA ÁREA

O contexto geológico no qual está inserida a bacia hidrográfica do rio Paute difere do brasileiro em muitos aspectos, e o elemento determinante deste contraste é a presença da Cordilheira dos Andes, resultante da subducção entre as placas tectônicas de Nazca e Sulamericana que, de sua constante colisão, promove eventos sísmicos. Por este motivo o fator sísmológico torna-se um condicionante de fundamental importância quando o assunto é a análise de estabilidade de encostas no Equador.

Em função de suas elevadas altitudes e proximidade com o Oceano Pacífico, apresenta um clima caracterizado por elevada umidade, e duas estações definidas pelo grau de precipitação pluviométrica. A época mais seca compreende de agosto a abril, enquanto a mais chuvosa, conhecida como invernal, compreende de maio a Júlio, período em que se intensificam os movimentos de massa.

As encostas ao longo do rio Paute, na região próxima à barragem da hidroelétrica Mazar, têm sido afetadas por movimentos e esse aspecto é fortemente evidenciado através das grandes zonas de instabilidade descritas por INECCEL (1998) como de alta periculosidade, denominadas Osomache Norte, Osomache, Santa Rita, Tubán, Osoyacu, Ñuñurcu, Llamacón, Chalacay, Quebrada Honda, Las Palmas e Las Juntas. As características muito bem descritas na referente bibliografia foram imprescindíveis para a interpretação geotécnica da área como um todo e na compreensão do seu perfil litológico.

De maneira geral, a região compreende duas unidades litológicas bem definidas: Alao-Paute e El Pan, ambas caracterizadas por rochas metamórficas, em especial representadas por intercalações de xistos e filitos fortemente fraturados.

As descontinuidades representadas por foliações típicas destas litologias e a presença de fraturas, com altos mergulhos inclinados no sentido da face livre das encostas, em especial na margem direita hidráulica do rio Paute, são fatores que favorecem os escorregamentos. Esta situação é observada ao constatar que a maioria dos grandes movimentos de massa estão localizados justamente neste lado do rio.

Sobre os maciços rochosos identificou-se um recobrimento de solo coluvionar nas zonas instáveis com espessuras de até 28m. Nas áreas não instabilizadas, o capeamento se dá com solo residual pouco expressivo, com profundidade média de 2m, sobre o qual se desenvolve uma cultura vegetal de plantio de pequeno porte.

Os planos de ruptura das áreas potencialmente instáveis ocorreram, originalmente, em horizonte de rocha descomprimida e alterada. Havendo uma reativação do movimento, observou-se que este, em sua maioria, mobilizou parte do depósito coluvionar resultante do evento anterior.

Com este cenário em mente, e tendo por foco a análise da estabilidade das encostas, fez-se necessário compreender não apenas o substrato rochoso, onde os movimentos mais profundos originalmente se desencadeiam, mas também o maciço terroso coluvionar, cujos grandes volumes de material já instabilizado, apresentam um risco em potencial.

### 6.1.1 SOLOS COLUVIONARES

#### 6.1.1.1 Caracterização e Classificação

Os resultados dos ensaios de caracterização identificaram solos, em média, com baixo teor de umidade natural. O índice de plasticidade (IP) enquadra o colúvio, segundo classificação IAEG (1979), em moderadamente plástico.

O peso específico natural médio foi em torno de  $20\text{kN/m}^3$ , enquanto o saturado foi  $25,5\text{kN/m}^3$ .

Pelas características, os solos enquadram-se de forma quase equilibrada nas quatro categorias propostas pelo sistema SUCS, embora um pouco mais expressiva na classe CL caracterizada por argila pouco plástica que apresenta impermeabilidade regular quando compactada, capacidade compressiva média, e reduzido poder drenante.

#### 6.1.1.2 Parâmetros de resistência

##### **Coesão para retroanálise**

Em se tratando de retroanálise, partiu-se do valor de coesão zero no exato instante do movimento ter ocorrido.

##### **Ângulo de atrito por retroanálise**

Apesar do método de Hoek-Brown já ser consagrado para determinar coesão e ângulo de atrito em solos homogêneos de vertentes infinitas, sua aplicação para o cálculo destes parâmetros em solo coluvionar, de composição heterogênea, foi uma tentativa elaborada com cautela. Para tanto, os resultados foram balizados por outros resultantes do método Bishop (INECEL, 1998).

Enquanto o método Bishop contempla movimentos que ocorram de forma circular, o de Hoek-Brown pressupõe que a superfície preferencial de ruptura seja plana, geralmente caracterizada pelo contato solo x rocha, ou acima deste, em solo, ao longo de descontinuidades planares marcantes.

Nas área de estudo, observam-se feições de escorregamentos translacionais, ou planar, ao longo de descontinuidades em rocha. Como o colúvio decorrente destes movimentos tem propensão a mover-se caso haja nova instabilidade, para fins de estudo considerou-se que a pior situação neste material não seria a que ocorre superficialmente, mas em maior profundidade. Isto se daria mais próximo do contato com o plano original de ruptura, ou seja, no contato solo x rocha.

Nesse caso, supôs-se uma reativação planar logo acima do plano de ruptura

remanescente, completamente envolto em solo, e assim não estaria condicionado pelas características intrínsecas da descontinuidade do maciço rochoso.

Com este panorama elaborado, determinou-se o  $\phi$  por retroanálise, considerando a coesão zero e incluindo um coeficiente sísmico de baixo grau supostamente presente no exato momento da ruptura, conforme histórico da região.

Outro parâmetro importante seria o conhecimento do nível freático no exato instante do movimento. Por desconhecer-se este valor, sua inferência foi simulada em três condições de saturação: 10%, 50% e 100%, e os resultados foram de ângulos de atrito variando entre 24,9° a 37°.

Comparando os resultados de ângulo de atrito retroanalizados com as declividades das encostas, ou ângulo crítico ( $i_c$ ), conclui-se que quanto maior o valor de  $\phi$  em relação ao  $i_c$  maior será a necessidade de água no sistema para deflagrar o movimento. Quanto menor o  $\phi$  em relação ao  $i_c$ , a água deixa de ser o principal agente deflagrador da instabilidade, pois esta já está instalada. Isto é o que ocorre nos colúvios de Ñuñurcu e Chalacay, cujas fendas de tração descritas e observadas em campo corroboram com o fato de que estão em movimento, ainda que em baixas velocidades.

#### **Parâmetros c e $\phi$ por ensaio triaxial**

O único ensaio triaxial realizado em solo coluvionar por CGM resultou em coesão igual a 49kPa e  $\phi$  de 20,3°. Apesar de não ser um universo amostral satisfatório, é uma informação próxima, em escala de grandeza, do menor valor de  $\phi$  retroanalizado.

Se comparados os resultados de  $\phi$  obtidos por retroanálise com este único ensaio feito em laboratório, os valores estariam acima deste, mas isto se deve à compensação pela ausência de coesão nos casos retroanalizados e, por fim, não alteram em grande escala o Fator de Segurança.

### **6.1.2 ROCHA DESCOMPRIMIDA E ALTERADA**

#### **6.1.2.1 Caracterização e Classificação Geomecânica**



Quanto à caracterização, as rochas apresentaram valores de massa e pesos específicos não muito superiores aos dos solos. Esta variação foi um incremento de 20% para as médias das rochas da unidade litológica Alao-Paute, e 23% para as rochas derivadas da unidade El Pan. Este acréscimo é baixo se considerarmos que se trata de rocha, mas justifica-se quando se observam outras características do maciço, como o alto grau de alteração e fraturamento.

Quanto à classificação geomecânica, seu enquadramento na Classe III do sistema RMR de Bieniawski, correspondente ao somatório de pesos final igual a 49, sugere parâmetros de coesão entre 200kPa e 300kPa, e ângulo de atrito interno da ordem de 25° até 35°, além de comportamento geral regular.

As classes de Barton correspondentes enquadram os maciços rochosos da região entre as categorias Ruim a Muito Ruim.

Ambas as classificações já atestam que o maciço, representado aqui pelo horizonte de rocha descomprimida e alterada, não é de boa qualidade no tocante ao comportamento geomecânico.

#### 6.1.2.2 Parâmetros de resistência

##### **Coesão para retroanálise**

Em se tratando de retroanálise, partiu-se do valor de coesão zero no exato instante do movimento ter ocorrido.

##### **Ângulo de atrito por retroanálise**

Como mencionado no capítulo referente a este tema, a tentativa de determinar os parâmetros de resistência por retroanálise com o uso de cálculos aplicados normalmente para solos, foi um procedimento especulativo com o intuito de avaliar se o procedimento é viável e coerente também para rocha.

Para detectar qual das discontinuidades presentes nos maciços tem maior potencial para comportar-se como superfície de escorregamento, analisou-se a relação entre as atitudes de cada família de fratura e das foliações mais marcantes em relação à

direção das encostas. Os mergulhos que resultaram direcionados no sentido da face livre das vertentes foram adotados como ângulos críticos ( $i_c$ ) que, para fins de análise, foram convertidos em mergulhos aparentes.

Observou-se que as superfícies mais suscetíveis a instabilizar-se na área são as foliações, seguidas por fraturas, e os mergulhos aparentes destas feições variaram desde 25,5° até 44,8°. O contato aflorante entre as unidades El Pan e Alao-Paute resulta em mergulho aparente de 60,5°, portanto superior à declividade da encosta, e por isso não é um plano potencial ao escorregamento.

Quando maior o resultado do ângulo de atrito em relação ao ângulo crítico, maior a necessidade de saturação para que se instale a situação de equilíbrio-limite pseudo-estático.

Como método determinístico de retroanálise, o cálculo para determinação de ângulo de atrito de rocha descomprimida e alterada mostrou-se eficiente.

### **Parâmetros $c$ e $\phi$ por ensaio de cisalhamento**

Os parâmetros de resistência do horizonte de rocha descomprimida e alterada, caracterizado por meio de ensaio de cisalhamento pelo CGM, apresenta 75% dos valores de coesão entre 100kPa até 250kPa, e 25% entre 35kPa e 40kPa. O ângulo de atrito interno variou de 30° e 37°. Estes valores revelam um maciço, em geral, condizente; salvo nas situações em que a coesão apresentou-se extremamente baixa (Sistema RMR).

Comparando os valores de  $\phi$  determinados por método direto com os retroanalisados, nota-se que estão em escala de grandeza similar e o uso para fins de estudo é viável.

## **6.2 FATOR DE SEGURANÇA**

### **6.2.1 DETERMINAÇÃO**

A determinação do Fator de Segurança para cada zona instável considerou a real inclinação do terreno, no caso das análises para os depósitos coluvionares, e os mergulhos

aparentes das descontinuidades mais desfavoráveis, no caso dos planos de fraqueza configurados em rocha.

Os sismos contribuem na redução do Fator de Segurança, mas em menor proporção. Por exemplo, enquanto o incremento de água no sistema reduz a estabilidade local em média 18% (comparando situações de igual condição estática ou dinâmica), o aumento do coeficiente sísmico ao dobro, para uma mesma situação de saturação, diminui o FS em apenas 3%. A ação conjunta de aumento de saturação e de aceleração sísmica, resultaria em uma redução de FS em 21%, resultante da soma das contribuições em separado. Estas deduções são expressas resumidamente nos quadros abaixo.

**Quadro 6-1.** Percentual médio de contribuição da água no Fator de Segurança.

Condição sísmica	SEM SISMO		
Presença de água no sistema	10% →	50% →	100%
Reflexo no Fator de Segurança		-17,72%FS	-18,25%FS
Condição sísmica	SISMO DE PROJETO		
Presença de água no sistema	10% →	50% →	100%
Reflexo no Fator de Segurança		-17,83%FS	-18,39%FS
Condição sísmica	SISMO SUPERESTIMADO		
Presença de água no sistema	10% →	50% →	100%
Reflexo no Fator de Segurança		-17,93%FS	-18,53%FS

**Quadro 6-2.** Percentual médio de contribuição da aceleração sísmica no Fator de Segurança.

Condição de saturação	SEM ÁGUA		
Variação da ação sísmica	Sem sismo →	Sismo de Projeto →	Sismo superestimado
Reflexo no Fator de Segurança		-3,35%FS	-3,27%FS
Condição de saturação	NÍVEL FREÁTICO A MEIA ALTURA (m = 0,5)		
Variação da ação sísmica	Sem sismo →	Sismo de Projeto →	Sismo superestimado
Reflexo no Fator de Segurança		-3,48%FS	-3,40%FS
Condição de saturação	NÍVEL FREÁTICO EM SUPERFÍCIE (m = 1)		
Variação da ação sísmica	Sem sismo →	Sismo de Projeto →	Sismo superestimado
Reflexo no Fator de Segurança		-3,64%FS	-3,57%FS

Estas análises comprovam a eficiência maior da água como agente potencializador de movimento, conforme já comprovado historicamente pelo aumento considerado de escorregamentos de encosta durante os períodos chuvosos, correspondentes à época invernal equatorial, entre os meses de maio e julho.

### 6.2.2 ESPACIALIZAÇÃO

Para que o cálculo de Fator de Segurança fosse executado de forma a abranger toda a área de estudo, fez-se uso de programa de geoprocessamento para facilitar o

processo.

Compôs-se um banco de dados em ArcMap com todas as variáveis necessárias para o cálculo de FS, segundo método de Hoek-Brown utilizado. Estas variáveis correspondem às mesmas utilizadas nos cálculos aplicados para a análise da estabilidade das zonas de alta periculosidade, incluindo inclinação do terreno (derivada do mapa de declividade), litologia (resultante do mapa geológico) e os parâmetros de resistência dos materiais (coesão e ângulo de atrito, segundo os valores retroanalizados). Estes parâmetros foram extrapolados para as demais áreas segundo as médias calculadas para as unidades Alao-Paute e El Pan.

Nas regiões cobertas por depósitos coluvionares, referentes às onze zonas de alta periculosidade descritas no trabalho de INECCEL (1998), o cálculo foi aplicado contemplando uma possível reativação do movimento no próprio colúvio, em uma superfície planar um pouco acima do contato solo x rocha. Por este motivo, nestas áreas todas as variáveis referiram-se aos próprios solos coluvionares: massa, peso, altura do depósito acima do plano de ruptura suposto, coesão e ângulo de atrito retroanalizados.

Nas demais áreas, dada a pouca expressividade de solos, os cálculos foram aplicados contemplando uma ativação de movimento ao longo de superfícies descontínuas presentes no horizonte de rocha descomprimida e alterada. Nestes casos, para as áreas compostas por rochas da unidade Alao-Paute, as variáveis utilizadas na fórmula foram as médias estimadas para esta litologia, com base nos resultados dos ensaios de caracterização e cisalhamento direto realizado. Da mesma maneira, para as áreas compreendidas pela unidade El Pan, as variáveis resultaram das médias determinadas para esta litologia. Assim, pode-se dizer que em toda a região de estudo, exceto nas 11 zonas de instabilidade, determinou-se o Fator de Segurança para um plano de ruptura em rocha estimado na profundidade média de cada litologia analisada, sendo a 26,60m de profundidade para Alao-Paute e a 27,54m para El Pan.

A facilidade com que os cálculos são executados no software permitiu que, uma vez o banco de dados concluído com todas as variáveis contempladas, a gama de simulações antes aplicada às zonas de instabilidade fosse extrapolada para toda a região.

Em se tratando de uma área vasta, para que os resultados fossem melhor visualizados espacialmente, as declividades foram agrupadas em polígonos com variação de inclinação de 5% entre si, e disto derivou 8 classes de declividade.

Os mapas resultantes indicam visualmente as áreas de maior e menor estabilidade para cada uma das situações simuladas.

### 6.2.3 Conclusões

Uma vez caracterizado o problema da área em questão, e creditado o método de determinação dos parâmetros de resistência por retroanálise, o uso de softwares de geoprocessamento agiliza o processo de cálculos de FS de forma a reduzir em muito o tempo de aplicação dos estudos, além de traduzir os resultados de forma visual.

As áreas mais suscetíveis à instabilidade são as que apresentam descontinuidades com mergulhos para a face livre das encostas.

A água é o principal agente na determinação das instabilidades, e o incremento de aceleração sísmica potencializa estes fenômenos.

A espacialização dos valores de Fator de Segurança, ainda que em intervalos de classes de declividade, facilita a interpretação destes valores nas diversas situações consideradas e auxilia na identificação de regiões mais propensas a instabilidades, servindo como ferramenta de caráter orientativo na implantação de uma obra. Para maior sensibilidade na análise dos resultados, seria mais adequado aumentar o número de classes em intervalos pequenos.

Com tempo e gastos reduzidos, e resultados satisfatórios quanto à identificação de áreas potencialmente instáveis em cada situação simulada, o alvo ao qual este trabalho se propôs, foi alcançado.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABGE (1998).** Geologia de Engenharia. Ed. Antonio Manoel dos Santos de Oliveira, Sergio Nertan Alves de Brito – São Paulo.
- AHRENDT, A. (2005).** Movimentos de massa gravitacionais - proposta de um sistema de previsão: aplicação na área urbana de Campos do Jordão - SP. 360p. Tese de Doutorado. Depto. de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos - EESC/USP. São Carlos - SP.
- AQUIMAPAS (2010).** [www.aquimapas.com](http://www.aquimapas.com)
- AGC (2011).** [http://www.agc.army.mil/publications/el\\_nino/](http://www.agc.army.mil/publications/el_nino/)
- ALMEIDA E. e RAMON P. (1997).** Estudio Neotectónico de los Andes Meridionales, Area del Proyecto Mazar. INECEL, Ingeniería Geotécnica. Informe Interno, inédito, Quito. 9p.
- ASPDEN J. A.; LITHERLAND M. e SALAZAR E. (1988).** Una interpretación preliminar de la historia colisional del centro y sur del Ecuador y posibles controles para la geología cenozoica y de mineralización polimetálica. Politécnica Monog. Geol., 6, 13, Quito, p.49-65.
- ASPDEN J. A. e LITHERLAND M. (1997).** Geología e historia colisional mesozoica de la Cordillera Real, Ecuador. Bol. Geol. Ecuat. 4, p.33-53.
- AUGUSTO FILHO, O. (1994).** Cartas de risco a escorregamentos: uma proposta metodológica e sua aplicação no Município de Ilha Bela, SP. 168p. Dissertação de Mestrado. Eusp.
- BARAZANGI, M. e ISACKS, B. (1976).** Spatial distribution of earthquakes and subduction of the Nazca plate beneath South America. Geology V.4, p.686-692.
- BARTON, N.; LIEN, R. e LUNDE, J. (1974).** Engineering Classification of rock masses for the design of tunnel support. RockMech., v.6, n.4.
- BASABE, P., JARAMILLO, H., ALMEIDA, E.; RAMÓN, P. e SERRANO, C. (1996).** Desestabilización de laderas. En: Sin plazo para la esperanza, reporte sobre el desastre de La Josefina, Ecuador, 1993. 213-223 p. Escuela Politécnica Nacional, Quito.



- BIENIAWISKI, Z. T. (1973).** Enginnering classification of jointed rock masses. *Tras. S. Afri. Inst. Civ. Eng.*, V15(2) p.335-343.
- BODARE, A. (1997).** Jord- och bergdynamik, 1B1435, Institutionen för anläggning och miljö, Royal Institute of Technology, Stockholm (In Swedish).
- BORCHARDT, N. (2005).** Diagnóstico geológico-geotécnico em vertentes do alto e médio curso da bacia do rio Sagrado, PR. Dissertação de Mestrado. Curitiba, PR. Editora da UFPR. 147p.
- BRISTOW, C. R. e HOFFSTETTER, R. (1977).** Lexique Stratigraphique International. V.5, Amérique Latine, fasc. 5 a 2, Ecuador (Second Edition). Centre National de la Recherche Scientifique.
- CHUQUIMUNI, R. A. A. (2005).** Análise numérica do alteamento de barragens de terra. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil. PUC-Rio.
- CODIGEM e BGS (1993).** Mapa Geológico de la República del Ecuador. Escala 1:1.000.000, Corporación de Desarrollo e Investigación Geológico - Minero Metalúrgica y British Geological Survey.
- CRUZ, P. T. (1996).** 100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto. São Paulo. Oficina de Textos. 647p.
- DINAGE (2001).** Mapa geológico del Ecuador. Ministerio de Energia y Minas. Dirección Nacional de Geologia.
- EGÜEZ A. e ASPDEN J. A. (1993).** The Meso-Cenozoic Evolution of the Ecuadorian Andes. 2nd International Symposium on Andean Geodynamics (ISA G' 93), Univ.Oxford (UK), Extended Abstracts Volume: 179-181.
- ENOKI, M.; KOKUBU, A. A. e IKEDA, Y. (1999).** Infiltration of rainwater and slope failure. In: Griffiths, Stokes & Thomas Eds. Landslides. p.27-35. Balkema - Rotterdam.
- FIORI, A. P. e CARMIGNANI, L. (2009).** Fundamentos de Mecânica dos Solos e das Rochas: Aplicação na Estabilidade de Taludes. Editora UFPR, 2ª. Edição, Curitiba - PR.
- GUADALUPE, R. E. A. (2011).** Análisis del uso del método GIN (Grouting Intensity Number) en el Proyecto hidroeléctrico Mazar. Proyecto previo a La obtención Del título de Ingeniero Geólogo. Escuela Politécnica Nacional. Quito-Ecuador.
- GUERRA, A. T. e GUERRA, A. J. T. (1997).** Novo Dicionário Geológico-Geomorfológico. p.76-77.
- GUIDICINI, G. e NIEBLE, C. M. (1976).** Estabilidade de taludes naturais e escavações. Edusp/Edgard Blücher. 170p.
- GUILLÉN, J. L. C. (2004).** Estudo de modelos constitutivos para previsão da liquefação em solos sob carregamento monotômico. Dissertação de Mestrado. PUC-Rio.
- HOEK, E. e BRAY, J. W. (1981).** Rock slope engineering. 3. ed. London: Institution of Mining and Metallurgy. 358p. Edição revisada.

- HUDSON, A. J. e HARRISON, J. P. (1997).** Engineering Rock Mechanics. An Introduction to the Principles. Elsevier Ltd. 444p.
- IGM-Ecuador (1969).** Carta Topográfica “Cola de San Pablo”, CT-ÑV-C4, Código Internacional 3886-II. Escala 1:50.000. Instituto Geográfico Militar del Ecuador. Quito - Ecuador.
- IAEG (1979).** Classification of rocks and soils engineering geological mapping. Bull. IAEG, vol.1, nº.19, p.364-371.
- INECEL (1982).** Proyecto Hidroeléctrico Paute Mazar – Estudios de Complementación de Factibilidad – Tomo III. Geología, Materiales de Construcción y Topografía. Consultores Mazar.
- INECEL (1984).** Estabilidad de laderas del embalse y materiales de construcción. Proyecto Hidroeléctrico Paute – Mazar, diseños definitivos. Informe elaborado por Electrowatt-Motor Columbus,-Salzgitter-ADEC-HIGGECO-INTEGRAL para el Instituto Ecuatoriano de Electrificación, 103 p. y anexos.
- INECEL (1998).** Proyecto Hidroeléctrico Paute Mazar. Licitación Proyecto Mazar – Volumen IV – Parte 11. Estudios de Factibilidad – Volumen 1 – Tomo 1 de 2.
- IPT (1984).** Estudos Geológico-geotécnicos para caracterização e classificação de maciços rochosos para projeto de engenharia (túneis, lavra a céu aberto e barragens). São Paulo. (IPT – Relatório, 19569)
- ISRM (1978).** Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks: Intl. Soc. Roch. Mech. Comm. On Standardisation of Laboratory and Field Tests, Intl. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., v.15, p. 89-97.
- KELLOGG, J. N., e V. VEGA, (1995).** Tectonic development of Panama, Costa Rica, and the Colombian Andes: Constraints from Global Positioning System geodetic studies and gravity, Geologic and Tectonic Development of the Caribbean plate boundary in southern Central America, GSA special paper, P. Mann, editor.
- LITHERLAND, M., e ZAMORA, A., (1991).** A terrane configuration for the Northern Andes. Comunicaciones (Santiago) 42, 122-126.
- LITHERLAND, M., ASPDEN, J. A. e JEMIELITA, R. A. (1994).** The metamorphic belts of Ecuador. Overseas Memoir 11. BGS, Keyworth, U.K. 147.
- MOROTE, C. H. S. (2006).** Estabilidade e deformação de taludes de solos sob carregamento sísmico. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil. PUC-Rio.
- MOSTYN, G. R. e SMALL, J. C. (1987).** Methods of stability analysis. In: WALKER, B. & FELL, R. ed. Soil slope instability and stabilisation. Cap.3, p.71-113.
- NEWMARK, N. M. (1965).** Effects of earthquakes on Dams and embankments. Fifth rankine lecture, vol.2, pp,139-159.

- PILGER, R. H. (1984).** Cenozoic plate kinematics, subduction and magmatism: South American Andes. *Journal of Geological Society London* 141 (1984) 793-802.
- PYKE, R. (1999).** Selection of seismic coefficients for use in pseudo-static stability analysis. Lafayette, California.
- STEINMANN, M. (1997).** The Cuenca basin of southern Ecuador: tectono-sedimentary history and the Tertiary Andean evolution. PhD thesis. Swiss Federal Institute of Technology Zurich. (Diss ETHZ n° 12297).
- UALG (2011).** [http://w3.ualg.pt/~jdias/INTROCEAN/B/22\\_FrontConverg.html](http://w3.ualg.pt/~jdias/INTROCEAN/B/22_FrontConverg.html)
- VARNES, D. J. (1978).** Slope movement types and processes. In: *Landslides analysis and control*. National Academy of Sciences. p.11-33. Washington.
- WINTER T., IGLESIAS R. e LAVENU A. (1990).** Presencia de un Sistema de Fallas Activas en el Sur del Ecuador. *Bol. Geol. Ecuat.*, V. 1, Quito. 53 – 67 p.
- WIKIPEDIA (2011).** [http://pt.wikipedia.org/wiki/Geografia\\_do\\_Ecuador](http://pt.wikipedia.org/wiki/Geografia_do_Ecuador)
- WWF.** <http://www.wwf.org.br/>
- ZEVALLOS, O. (1996).** Rotura de la presa. En: *Sin plazo para la esperanza, reporte sobre el desastre de La Josefina, Ecuador, 1993*. 95-125 p. Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- UAZUAY (2011).** <http://www.uazuay.edu.ec/promsa/paute/home.htm>